



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**



ALAN DE GOIS BARBOSA

**Operação Otimizada das Usinas Hidrelétricas do São Francisco:
Integração com as Bacias do Tocantins, Paraná e do Nordeste
Setentrional**

São Cristóvão – SE
2017

Alan de Gois Barbosa

**Operação Otimizada das Usinas Hidrelétricas do São Francisco:
Integração com as Bacias do Tocantins, Paraná e do Nordeste
Setentrional**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Sergipe (UFS), para
encerramento do componente curricular
ENCIV0157 - Trabalho de Conclusão de Curso e
conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes.

São Cristóvão – SE
2017

É concedida à Universidade Federal de Sergipe permissão para reproduzir cópias desta monografia e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Assinatura

GOIS BARBOSA, Alan de.

OPERAÇÃO OTIMIZADA DAS USINAS HIDROELÉTRICAS DO SÃO FRANCISCO: INTEGRAÇÃO COM AS BACIAS DO TOCANTINS, PARANÁ E DO NORDESTE SETENTRIONAL / Alan de Gois Barbosa.

São Cristóvão, 2017

87 p.: il.

Trabalho Acadêmico Orientado. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

I. Universidade Federal de Sergipe

II. Operação Otimizada das Usinas Hidroelétricas do São Francisco: Integração com as Bacias do Tocantins, Paraná e do Nordeste Setentrional.

Alan de Gois Barbosa

**Operação Otimizada das Usinas Hidrelétricas do São Francisco:
Integração com as Bacias do Tocantins, Paraná e do Nordeste
Setentrional**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Sergipe (UFS), para
encerramento do componente curricular ENCIV0157
- Trabalho de Conclusão de Curso e conclusão da
graduação em Engenharia Civil.

Aprovado em 08 de novembro de 2017.

Banca Examinadora

Nota: _____

Professor Dr. Ludmilson Abritta Mendes – Universidade Federal de Sergipe
(Presidente – Orientador)

Nota: _____

Professora Dra. Nilma Fontes de Araujo Andrade – Universidade Federal de Sergipe
(Examinador 1)

Nota: _____

Engenheiro Erwin Henrique Menezes Schneider – Universidade Federal de Sergipe
(Examinador 2)

São Cristóvão – SE

2017

Agradecimentos

Somos pequenos colecionadores, de sonhos, de conhecimento e de emoções. Uma etapa bastante decisiva está se completando e junto com ela vem o sentimento de gratidão. Primeiramente a Deus por me proporcionar todas oportunidades, tanto as que vieram quanto as que virão. Em seguida de minha família, principalmente meu alicerce Ana Araujo, meu pai José Ambrósio e meu irmão Luan, sem vocês eu não sou ninguém. Devo lembrar também de minha segunda mãe, Marinalva, que esteve comigo nos meus primeiros anos de vida, meu tio/padrinho José Araújo, que me passou vários ensinamentos e a meus padrinhos José Luis e Maria José.

Como dizem, amigos são a família que escolhemos, portanto venho agradecer à minha amizade mais antiga, Kevin. Também devo muito a Ronaldo, Ítalo, Karl, Murilo, Renério, Torugo, Thieres Cunha (Gogó), Márcio, Morgana, Isabelle e os demais que sabem a importância que têm, cada um fez e faz um papel enorme em minha vida. Não devo esquecer dos colegas de classe, estes sofreram junto comigo, compartilharam conhecimento e experiências. Obrigado.

Há quem diga que trabalho e trabalho e amizade é amizade. Pois é, Ludmilson conseguiu suprir o papel de orientador, amigo e quase um irmão, que sorte a minha heim? Obrigado cara!

Por fim, obrigado, gratidão é o único sentimento que tenho neste momento e digo, há muito mais por vir.

“ Você não fez mais que sua obrigação ... “
Ana A. G. Barbosa

Resumo

O rio São Francisco há muito é importante para vários setores da sociedade e economia brasileira. Diante dos mais variados consumidores, consuntivos ou não, necessita-se planejar a operação dos reservatórios implantados em sua cascata, principalmente para períodos críticos. A modelagem matemática aliada a otimização podem ser de grande utilidade em cenários complexos, os quais envolvem diversas variáveis e restrições. Além disso, o uso de softwares com licença livre pela comunidade acadêmica faz com que o conhecimento perca ainda mais fatores limitantes, como é o caso de licenças comerciais. Portanto, o presente trabalho apresenta a operação otimizada do modelo para as usinas hidrelétricas da bacia hidrográfica do rio São Francisco para os períodos críticos de 1950-1955, 1998-2003 e 2011-2016 em dois cenários, considerando-se ou não um reforço de vazão vindos de afluentes do rio Tocantins e Paraná. Tentou-se atender as seguintes demandas: uso consuntivo, garantia física das usinas hidrelétricas e vazão natural a jusante do barramento. Os resultados, analisados por índices de desempenho, melhoraram o desempenho do sistema, tanto quando se observa os valores para uma única usina, quanto para o sistema global. Entretanto, mesmo com o reforço, o sistema não atendeu a demanda usuários.

Palavras chave: otimização; operação de reservatórios; programação não linear.

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANA – Agência Nacional de Águas

AGB Peixe Vivo – Associação Executiva de Apoio à Gestão de Bacias Hidrográficas Peixe Vivo

BHSF – Bacia Hidrográfica do rio São Francisco

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco

CGH – Centrais Geradoras Hidroelétricas

FO – Função Objetivo

GAT – Grupo de Acompanhamento Técnico

MMA – Ministério do Meio Ambiente

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCH – Pequena Central Hidroelétrica

PD – Programação Dinâmica

PISF – Projeto de Integração do São Francisco

PL – Programação Linear

PNL – Programação não Linear

RSF – Rio São Francisco

SF – São Francisco

SFA – Alto São Francisco

SFB – Baixo São Francisco

SFM – Médio São Francisco

SFSM – Submédio São Francisco

SIN – Sistema Interligado Nacional

UC – Uso Consuntivo

UHE – Usina Hidrelétrica

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de Resolução de um Sistema pelo Método da Simulação.....	6
Figura 2 - Curva Guia para Operação de Reservatório	7
Figura 3 - Representação do Ponto de Solução Ótima de um problema de Otimização	8
Figura 4 - Representação de um Problema em Programação Linear	9
Figura 5 - Função Objetivo com Mínimos Locais	10
Figura 6 – Comparação em tempo de processamento entre Julia e Outras Linguagens	11
Figura 7 - Representação dos Parâmetros Usuais de Comportamento do Sistema	12
Figura 8 - Representação da Divisão da BHSF.....	14
Figura 9 - Ciclo Interanual de Precipitação Acumulada (1961-2014)	15
Figura 10 - Disponibilidade Hídrica na Bacia do São Francisco. a) Qmed, b) Q95	16
Figura 11 - Danos Humanos médios por Estiagem e Seca - Região Nordeste.....	17
Figura 12 - Distribuição da Demanda Hídrica da BHSF.....	17
Figura 13 - Relação Área Irrigada / Área Municipal.....	19
Figura 14 - Distribuição das Principais UHE na Calha do RSF.....	21
Figura 15 - Produção de Energia Hidrelétrica no Nordeste	21
Figura 16 - Projeto de Integração do rio São Francisco (PISF)	23
Figura 17 - Média de Precipitação Anual por Região Fisiográfica	24
Figura 18 - Região de Possível Comunicação entre os rios Sapão e do Sono.....	24
Figura 19 - Resumo das Trechos Navegáveis, Projetos de Integração e Zonas de Conflito	25
Figura 20 - Desempenho em Atendimento ao UC para Três Marias	34
Figura 21- Desempenho em Atendimento ao UC para Sobradinho	35
Figura 22 - Desempenho Global do Sistema para Atendimento de UC.....	36
Figura 23- Índices de Desempenho para Garantia Física - Três Marias	37
Figura 24 - Índices de Desempenho para Garantia Física – Sobradinho	37
Figura 25- Desempenho em Atendimento à Garantia Física para Três Marias.....	38
Figura 26 - Desempenho em Atendimento à Garantia Física para Sobradinho	39
Figura 27 - Desempenho Global do Sistema para Garantia Física.....	40
Figura 28- Índices de Desempenho para Vazão Ambiental - Três Marias.....	41
Figura 29- Índices de Desempenho para Vazão Ambiental - Sobradinho	41
Figura 30 - Desempenho em Atendimento à Vazão Ambiental para Três Marias.....	42
Figura 31 - Desempenho em Atendimento à Vazão Ambiental para Sobradinho	43
Figura 32 - Índices Globais para Vazão Ambiental	44

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Uso do Solo por Região Fisiográfica, em % (2010)	15
Tabela 2 - Outorgas e Retiradas para Abastecimento Industrial	20
Tabela 3 - Dados das UHE.....	27
Tabela 4 - Dados de Evaporação Potencial (mm/mês).....	27
Tabela 5 - Demandas por UHE (m ³ /s).....	28
Tabela 6 - Garantia Física das UHE do RSF.....	28
Tabela 7 – Demanda Ambiental a Jusante	28
Tabela 8 - Vazões de Reforço	29
Tabela 9 - Coeficientes da Equação cota <i>versus</i> Q_{jus}	29
Tabela 10 - Coeficientes da Equação cota <i>versus</i> S	30
Tabela 11 - Desempenho do Julia em PNL.....	32
Tabela 12 - Índices de Desempenho para UC - Três Marias.....	33
Tabela 13 - Índices de Desempenho para UC - Sobradinho	33
Tabela 14 - Índices de Desempenho Global para UC	36
Tabela 15- Índice de Desempenho Global para Garantia Física	40
Tabela 16 - Índices Globais para Vazão Ambiental.....	44

Lista de Apêndices

Apêndice 1 - Algoritmo em Julia	50
Apêndice 2 - Vazões Disponibilizadas para atendimento de UC - Retiro Baixo	59
Apêndice 3 - Vazões Disponibilizadas para atendimento de UC – Queimado	60
Apêndice 4 - Vazões Disponibilizadas para atendimento de UC – Itaparica.....	61
Apêndice 5 - Vazões Disponibilizadas para atendimento de UC - C. P. Afonso/Moxotó	62
Apêndice 6 - Vazões Disponibilizadas para atendimento de UC – Xingó.....	63
Apêndice 7 - Índices de Desempenho para UC.....	64
Apêndice 8 – Energia Gerada para atendimento à Garantia Física - Retiro Baixo	65
Apêndice 9– Energia Gerada para atendimento à Garantia Física - Queimado	66
Apêndice 10 – Energia Gerada para atendimento à Garantia Física - Itaparica.....	67
Apêndice 11– Energia Gerada para atendimento à Garantia Física - P. Afonso/Moxotó	68
Apêndice 12– Energia Gerada para atendimento à Garantia Física - Xingó.....	69
Apêndice 13 - Índices de Desempenho para Garantia Física	70
Apêndice 14 - Vazão de Jusante para atendimento à Vazão Mínima Natural - Retiro Baixo.....	71
Apêndice 15- Vazão de Jusante para atendimento à Vazão Mínima Natural – Queimado	72
Apêndice 16 - Vazão de Jusante para atendimento à Vazão Mínima Natural – Itaparica	73
Apêndice 17 - Vazão de Jusante para atendimento à Vazão Mínima Natural - P. Afonso/Moxotó	74
Apêndice 18- Vazão de Jusante para atendimento à Vazão Mínima Natural – Xingó	75
Apêndice 19 - Índices de Desempenho para Atendimento à Vazão Natural Mínima Natural	76

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.1.1. História do rio São Francisco	1
1.1.2. Importância no Cenário Atual	2
1.1.3. Modelagem e Otimização na Gestão de Recursos Hídricos.....	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo Geral	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. MODELAGEM e OPERAÇÃO DE SISTEMAS HÍDRICOS.....	4
2.1.1. Regra de Operação.....	6
2.1.2. Otimização.....	7
2.1.3. A Linguagem de Programação JULIA	10
2.2. ÍNDICES DE DESEMPENHO	12
2.2.1. Confiabilidade	12
2.2.2. Resiliência	13
2.2.3. Vulnerabilidade	13
2.3. BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO.....	14
2.3.1. Descrição da Bacia	14
2.3.2. Disponibilidade Hídrica – Águas Superficiais	16
2.3.3. Usos Múltiplos.....	17
2.3.4. Projetos de Integração de Bacias	22
3. METODOLOGIA.....	26
3.1. DEFINIÇÃO DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO	26
3.2. LEVANTAMENTO DE DADOS	26
3.2.1. Dados de Vazão Natural	26
3.2.2. Definição e Levantamento de Dados das UHE	26
3.2.3. Levantamento de Demandas.....	27
3.2.4. Levantamento de Vazões de Reforço	28
3.3. EQUACIONAMENTO	29
3.4. DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS.....	31
4. RESULTADOS	32

4.1.	PROCESSAMENTO	32
4.2.	USO CONSUNTIVO	32
4.3.	GARANTIA FÍSICA	37
4.4.	VAZÃO AMBIENTAL	41
4.5.	PONTOS IMPORTANTES:	45
5.	CONCLUSÃO	46

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1.1. História do rio São Francisco

Em 4 de outubro de 1501, os viajantes Américo Vespúcio e André Gonçalves chegaram à foz de um vasto rio e, obedecendo os costumes da época, o batizaram com o nome de São Francisco, já que era dia do santo São Francisco de Assis. O Velho Chico, ou “rio da unidade nacional” aproxima o litoral do sertão e integra homens e culturas, além de ter sido usado como trilha para transporte e criação de gado na época colonial, já que o litoral passou a ser ocupado com o cultivo da cana de açúcar (MACHADO, 2009).

Durante muito tempo o RSF foi considerado o principal meio de interligação entre as regiões Sudeste e Nordeste, servindo de via navegável para as embarcações a vapor da época (CGEE, 2012).

No século XX, as águas do rio já começaram a despertar interesse para o aproveitamento energético. Em 1903, o empreendedor Delmiro Gouveia iniciou a construção da primeira usina hidrelétrica do rio São Francisco (RSF). Concebida com intuito de suprir a necessidade energética de uma fábrica de linhas, Delmiro viu na famosa cachoeira de Paulo Afonso – BA o local perfeito para a instalação de uma Usina Hidrelétrica (UHE), que por projeto, tinha capacidade de 1500 cavalos (LIMA, 2013). Localizada em Delmiro Gouveia – BA, construída em meio a um paredão de granito e ao lado da antiga cachoeira, a UHE de Angiquinho encontra-se em estado razoável de preservação, mas desativada (ALMG, 2003).

Em 1950, Getúlio Vargas criou a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) e viabilizou a construção da UHE Paulo Afonso I, que foi inaugurada em 1955, com capacidade inicial de 184 MW. Nas décadas seguintes foram inauguradas também Paulo Afonso II e III. Paulo Afonso IV, o empreendimento mais recente do conglomerado, entrou em funcionamento em 1979. A barragem de Sobradinho, inaugurada em 1979, com capacidade de 1050 MW, possibilitou a regularização de vazão das usinas a jusante do rio. Xingó entrou em operação em 1994, com 3000 MW. Apolônio Sales ou Moxotó, com 440 MW, Luiz Gonzaga ou Itaparica, funciona desde 1998 e conta com 1500 MW (ALMG, 2003).

No estado de Minas Gerais, a UHE de Três Marias, sob responsabilidade da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), em operação desde 1962, tem como finalidade a regularização de vazões para os longos períodos de estiagem e controle das cheias, além de

melhorar a navegação e o potencial para implantação de trechos irrigados. A UHE conta com capacidade de geração de 396 MW (ALMG, 2003).

1.1.2. Importância no Cenário Atual

Um dos melhores exemplos de usos múltiplos das águas pode ser percebido na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco (BHSF), ou seja, ela é uma das bacias brasileiras cujos recursos hídricos são aproveitados das mais variadas formas, atendendo a uma população de cerca de 14,1 milhões de habitantes (MMA, 2006; CGEE, 2012). A BHSF oferece cerca de 70% da água superficial consumida pela região Nordeste (CGEE, 2012). As principais atividades econômicas exercidas na BHSF são: agroindústria, aquicultura, geração de energia elétrica, indústria, mineração, pecuária e pesca. Além de haver cerca de 2.000 km de trechos navegáveis ao longo de seu curso (MMA, 2006).

Mas o RSF e seus afluentes também sofrem com o impacto do despejo de águas contaminadas de diversas fontes. Segundo o MMA (2006), as principais fontes de poluição são: a indústria alimentícia, atividades de mineração, agricultura, pecuária, suinocultura, lançamento de esgoto doméstico e atividades metalúrgicas.

Por estar submetida à vários regimes de chuvas, a região da BHSF também sofre com a ocorrência de eventos críticos. Historicamente, os fenômenos de seca são recorrentes na região, já que cerca de 57% do território da bacia está inserido na região semiárida (CGEE, 2012). Esta região hidrográfica conta ainda com a influência das retiradas para uso consuntivo. Em 2002, por exemplo, o fator que relaciona demanda total (m^3/s) dividido por vazão com 95% de permanência (m^3/s) chegou a 18,8%. Fenômenos de enchentes também são relevantes, ocorrem principalmente na região do Alto São Francisco. São exemplos as ocorridas em 1919, 1925, 1943, 1946, 1949, 1979, 1983, 1992 e 2004, mas que são amortizadas pelo sistema de controle de cheias de algumas UHE construídas ao longo da calha principal do rio e a implantação de sistemas de alerta (MMA, 2006).

1.1.3. Modelagem e Otimização na Gestão de Recursos Hídricos

Um dos principais ramos de atuação da engenharia de recursos hídricos é na gestão dos mesmos. Esta atividade envolve a tomada de decisões referentes a sua alocação, ou seja, visa alterar os padrões da disponibilidade hídrica, sejam eles qualitativos ou quantitativos, para atender às demandas (PORTO et al., 2002).

Diante dos diversos usos que um corpo hídrico pode atender, a modelagem do problema pode auxiliar na busca de um resultado que atenda satisfatoriamente todos os usuários. Segundo

Porto et al. (2002), a dinâmica hídrica pode ser equacionada matematicamente de diversas formas e de acordo com o interesse dos usuários, otimizada ou simulada.

O processo de otimização pode ser feito de diversas maneiras. As principais envolvem a enumeração ou uso de programação dinâmica. Já para apenas se simular usam-se modelos de complexidade inferior e mais intuitivos, mas que, geralmente, não conseguem atender todos os usos em períodos críticos (PORTO et al., 2002).

Exemplos do uso de modelos para simular a interação entre sistemas hídricos podem ser encontrados nos trabalhos de: Almeida (2006), que simulou o processo de transformação de chuva em vazão e de chuva em fluxo subterrâneo de água; Cruz e Tucci (2007) que conceberam um modelo que levava em conta a simulação hidrológica junto com os custos de canais e implantação de reservatórios de retenção e retenção para se evitar eventos de cheia para que se otimizassem os resultados e diminuíssem os custos; e Celeste, Suzuki e Kadota (2003) que simularam a alocação ótima de um sistema de abastecimento, abastecido por poços e uma barragem, além do controle de cheias feito por esta.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é otimizar a operação dos reservatórios das UHE situados na BHSF levando em conta obras de transposição, reforço de vazão e atendendo de maneira mais eficiente possível todas as demandas, tanto energéticas quanto de usos múltiplos.

1.2.2. Objetivos Específicos

São objetivos específicos do trabalho:

- Desenvolver um algoritmo de otimização para operação de usinas hidrelétricas em uma linguagem de programação de alto nível, com licença livre e de fácil aplicação;
- Avaliar o impacto decorrente do reforço de vazão no rio São Francisco e afluentes proveniente das bacias do Tocantins e do Paraná;
- Realizar a operação otimizada das usinas da bacia do rio São Francisco para atendimento dos usos múltiplos: geração de energia elétrica e usos consuntivos e não consuntivos;
- Avaliar o comportamento do sistema de usinas da bacia do rio São Francisco por índices de desempenho para os períodos de seca mais severos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MODELAGEM E OPERAÇÃO DE SISTEMAS HÍDRICOS

A disponibilidade hídrica de uma região varia periodicamente, de modo que existem períodos com grande oferta que são alternados por períodos de escassez (RIGUETTO, 1998). Além disto, a demanda pode ultrapassar os limites de disponibilidade hídrica fazendo com que haja carência de atendimento (PORTO et al., 2002). Com o objetivo de viabilizar o atendimento aos vários usos, sejam eles consuntivos, ou seja, diminuindo sua disponibilidade, como a demanda urbana, uso industrial, irrigação e dessedentação de animais, ou não consuntivos, como a navegação e geração de energia elétrica. Portanto, a engenharia de recursos hídricos trabalha com o represamento de águas em determinadas seções. Além disto os barramentos podem funcionar como dispositivo de controle de cheias (RIGUETTO, 1998).

Porto et al. (2002) afirma que a complexidade no problema de gerir os recursos hídricos se encontra no fato de que há diversas possibilidades de suprimento e de variação na demanda. O uso desses recursos por vários consumidores pode criar conflitos entre os usuários, portanto existem entidades multidepartamentais, a exemplo dos comitês de bacia, para propor regras operacionais e tentar gerir o conflito de interesses.

Como já dito, o represamento de águas forma sistemas de múltiplos usos que envolvem aspectos operacionais, hidrodinâmicos e interesses sociais. A operação dos mesmos torna-se então complexa e multidisciplinar, portanto é interessante que se utilize técnicas de modelagem e otimização para tal finalidade (RIGUETTO, 1998).

Ainda segundo Porto et al. (2002), quando as situações reais são demasiadamente complexas, mas que grande parte da complexidade é devido a características irrelevantes, empregam-se modelos que levam em conta apenas os aspectos relevantes para a solução do problema. Respeitando-se assim o princípio da parcimônia, definido por Tucci (2005) como a representação mais próxima da realidade e com o número mínimo de parâmetros.

Tucci (2005) trata o problema da operação de um reservatório modelando-o para reter volumes para atender as demandas em períodos de estiagem. Considera-se a Equação 1 como continuidade:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) - E(t) \quad (1)$$

onde t representa o instante de tempo; $\frac{dS}{dt}$ representa o armazenamento S em determinado instante de tempo; $I(t)$ representa a vazão de entrada (m^3/s); $Q(t)$ é a vazão de saída (m^3/s) e $E(t)$ é a perda por evaporação (m^3).

Em determinado período de tempo é possível se conhecer o volume inicial S_0 (m^3) e a vazão de entrada no reservatório I_0 . Já a vazão de saída pode ser decomposta na expressão mostrada pela Equação 2.

$$Q(t) = Q_{jus} + Q_{dem} \quad (2)$$

onde Q_{jus} é a vazão mínima que deve ser mantida à jusante (m^3/s) definida pelo órgão ambiental e Q_{dem} é a vazão destinada para as demandas.

A evaporação é expressada pela Equação 3.

$$E(t) = Ep(t) \cdot A(t) \quad (3)$$

onde $Ep(t)$ é a evaporação potencial da superfície líquida ($mm/mês$) e $A(t)$ é a área superficial do reservatório, geralmente representada por algum polinômio que relaciona a área superficial da lâmina d'água com o volume do reservatório.

Nos reservatórios em que há aproveitamento da queda para geração de energia, Kelman et al. (2006) afirmam que a potência produzida pode ser calculada pela Equação 4.

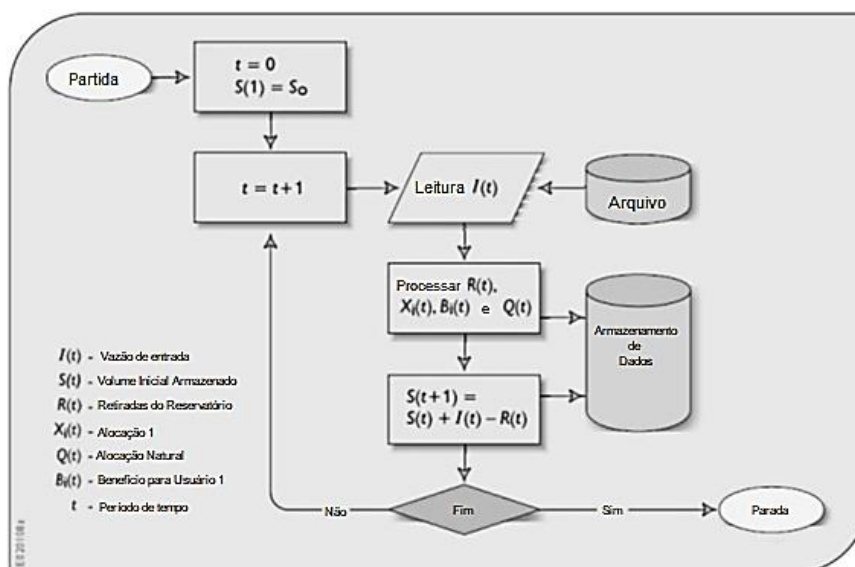
$$P = g \cdot \eta \cdot Q_{turb} \cdot h \quad (4)$$

onde g é o valor da aceleração da gravidade local (m/s^2), η é a produtividade específica da usina ($MW/m^3/s/m$), Q_{turb} a vazão turbinada (m^3/s) e h é a diferença entre a cota do reservatório e a cota de jusante (m).

Para que se entenda o comportamento de um sistema com reservatórios de várias UHE em cascata, é necessário que se analise a operação dos mesmos em conjunto, o que pode ocasionar um problema de dimensionalidade. Riguetto (1998), Loucks e Beek (2006) afirmam que ao se aumentar o número de variáveis do problema, a resolução do mesmo acaba sendo inviável já que a complexidade do problema em PD aumenta exponencialmente causando a “praga da dimensionalidade”.

A análise de sistemas de recursos hídricos geralmente se utiliza de duas técnicas: quando se deseja operações matemáticas mais simplificadas e intuitivas, utiliza-se a simulação (PORTO et al., 2003). Neste processo é analisada a resposta do sistema para uma determinada situação. No caso de sistemas complexos, tal fato se tornaria ineficiente pela variedade de situações em que um conjunto de reservatórios pode funcionar (SANTANA, 2015). Um exemplo de simulação pode ser observado na Figura 1, onde é apresentado um exemplo de fluxograma para resolução da simulação do funcionamento de um reservatório.

Figura 1 - Exemplo de Resolução de um Sistema pelo Método da Simulação.



Fonte: Adaptado de Loucks e Beek, 2005.

A outra técnica se caracteriza pelo uso de otimização, defendida nos trabalhos de Yeh (1985), Riguetto (1998), Loucks e Beek (2006) e Rao (2009). Esta abordagem será melhor detalhada no presente trabalho.

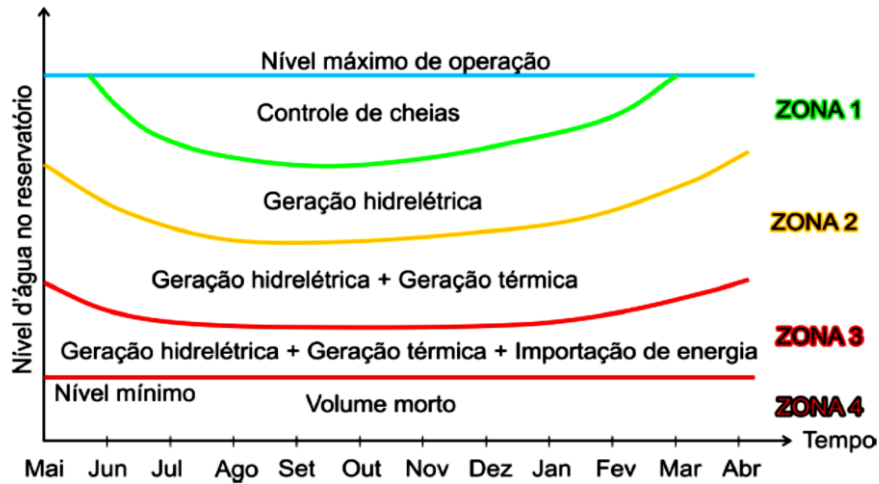
2.1.1. Regra de Operação

Existem diversas regras de operação para um dado reservatório. Bravo (2010) cita a técnica de se dividir o volume do reservatório em zonas, e cada subdivisão dessa tem um programa de descarga específico. Estas divisões podem ou não variar no decorrer do ano e são chamadas de curva-guia. Observa-se na Figura 2 um exemplo de curva, em que a operação tenta se aproximar da Zona 1, onde o volume armazenado no reservatório garante o atendimento das demandas e o volume de espera para o controle de cheias, ou seja, quando, no respectivo mês se ocupa o volume destinado para controle de cheias, há vertimento na UHE.

Bravo (2010) ainda apresenta outras técnicas como a *Pack rule* e *Hedging rule*, que levam em conta períodos de excesso de água e escassez de água na operação de um único reservatório. Já na operação de sistemas em cadeia, cita a *NYC rule* e a *Space rule*, que considera a probabilidade de enchimento e o espaço disponível, respectivamente.

Já Riguetto (1998), Celeste (2003), Porto et al. (2003), Tucci (2005), Bravo (2008), Curi (2012), Mendes (2012), Santana (2015), Melo (2015) e Santos (2015) recomendam o uso de técnicas de otimização para se encontrar o conjunto de soluções que melhor atendem ao problema.

Figura 2 - Curva Guia para Operação de Reservatório



Fonte: Bravo, 2010.

2.1.2. Otimização

Tucci (2005) define otimização como a busca pelo valor de uma ou mais variáveis que melhor satisfaça as condições impostas para o sistema. Em geral, problemas de otimização buscam o valor mínimo ou máximo de uma Função Objetivo (FO) que relaciona as variáveis independentes.

Para Rao (2009), o problema de otimização está na busca pelo valor Mínimo ou Máximo da Função Objetivo dada pela Equação 5.

$$y = F[x] \quad (5)$$

onde y é uma função dependente de várias variáveis x independentes.

Mas, a maioria dos sistemas impõem algumas restrições que podem ser dadas pela Equação 6 e Equação 7 que caracterizam um problema de otimização sujeito a restrições.

$$f_k[x] \leq 0 \text{ para } k=1,2,\dots, p \quad (6)$$

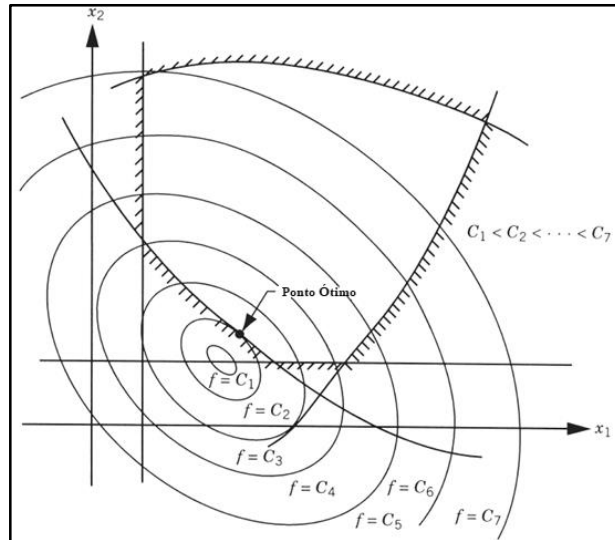
$$f_h[x] = 0 \text{ para } h=1,2,\dots, q \quad (7)$$

A Figura 3 representa a solução ótima de um problema de otimização. É importante ressaltar que pode existir mais de uma restrição, seja ela de igualdade ou de desigualdade, além disso, os valores de m , n , p e q não precisam ser relacionados. Quando não existem restrições, trata-se de um problema de otimização irrestrita.

Como em recursos hídricos existem objetivos conflitantes, a FO pode ser escrita de forma que pondere cada objetivo específico por um valor fixo α , ou seja, a função passa a ser Multiobjetivo com diferentes pesos para cada objetivo. A Equação 8 mostra sua formulação geral.

$$F(x) = \alpha_1 f x_1 + \alpha_2 f x_2 \quad (8)$$

Figura 3 - Representação do Ponto de Solução Ótima de um problema de Otimização



Fonte: Adaptado de Rao, 2009.

Quando a FO e as restrições são lineares, trata-se então de um problema de Programação Linear (PL). Já se uma das restrições e ou a FO forem modeladas como equações não-lineares, trata-se então de um problema de Programação Não Linear (PNL) (TUCCI, 2005). Mas, caso as condições de máximo ou mínimo não sejam satisfeitas pelo problema, é então determinado um ponto de inflexão e o problema não converge para uma solução.

Além da PNL, existem diversos modelos de PD, Programação Dinâmica Discreta (PDD), Programação Dinâmica Diferencial Discreta (PDDD), Programação Dinâmica de Aproximações Sucessivas (PDAS), Programação Dinâmica Estocástica Paramétrica (PDEP) e Programação Dinâmica Estocástica com Gradiente (PDEG) (LIMA E LANNA, 2005). Porto et al. (2002) ainda trazem o método da Programação Dinâmica Estocástica (PDE), um procedimento trabalha com modelos de decisões sequenciais, onde o problema é desmembrado em vários problemas interligados. Como neste trabalho utiliza-se a PNL, este método será descrito com mais detalhes na sequência.

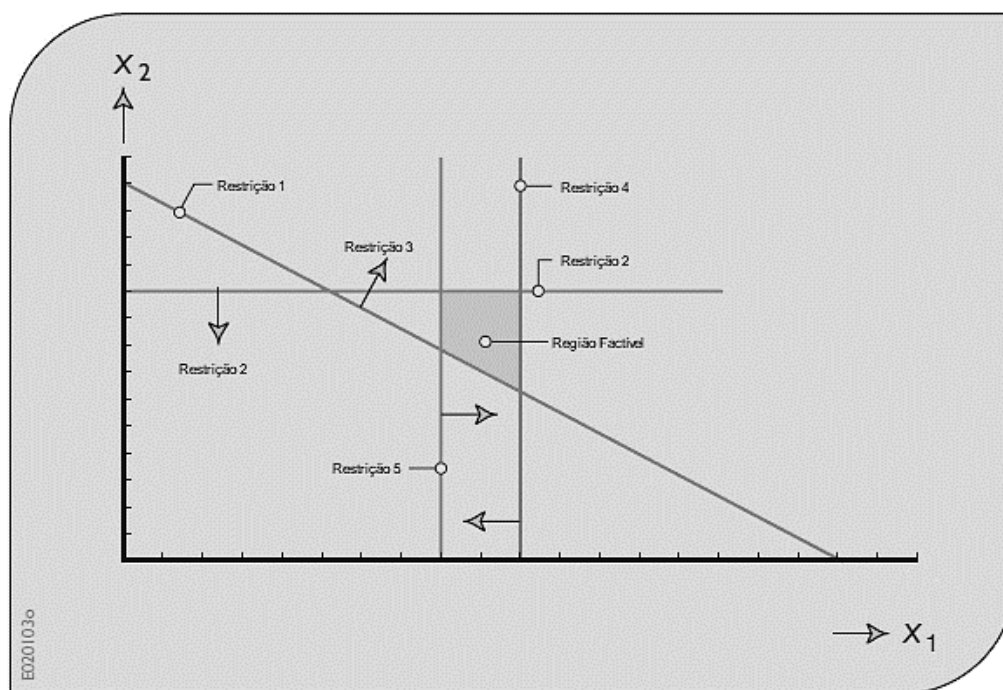
2.1.2.1. Programação Não Linear (PNL)

Com o advento da tecnologia de processamento e armazenamento, o uso da PNL vem despertando cada vez mais interesse da comunidade científica, como mostrado por NASA (2016). Já que a convergência requer mais processamento que outras técnicas (YEH, 1985; LIMA e LANNA, 2005).

A lentidão e a grande alocação de memória requeridos pela PNL fizeram com que, durante muito tempo a PL e a Programação Dinâmica (PD) se destacassem na resolução de problemas de otimização. Soma-se ainda a complexidade de sua formulação matemática, o que

pode acabar dificultando a implementação de modelos estocásticos, diferentemente do que acontece na PD (YEH, 1985). A vantagem da PL se dá pela simplicidade do problema. Sua solução ótima geralmente se encontra em um vértice de restrições, como mostrado na Figura 4, mas a linearização pode ser um problema pela perda de precisão e pela dificuldade de linearização de algumas situações (PORTO et al., 2002).

Figura 4 - Representação de um Problema em Programação Linear



Fonte: Adaptado de Loucks e Beek, 2006.

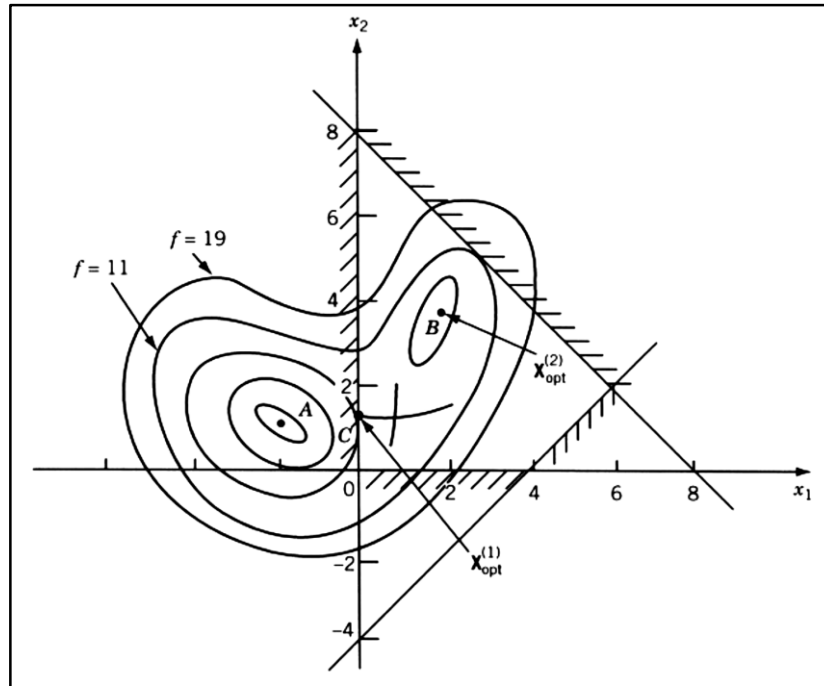
Lima e Lanna (2005) afirmam que a PNL possibilita uma formulação mais genérica e com restrições não lineares. Já Yeh (1985) diz que ao se tratar de problemas em grande escala, como a operação de vários reservatórios atendendo a funções multiobjetivo, a PNL se destaca em relação aos outros métodos. Segundo Porto et al. (2002), a grande vantagem em se usar PNL é que o problema não necessita de quase nenhuma simplificação, o que aumenta a precisão da solução ótima.

Existem várias técnicas disponíveis para resolução de problemas pela PNL. Rao (2009) divide-as em métodos diretos, onde as restrições são explícitas, e em métodos indiretos, onde o problema é resolvido por uma sequência de problemas irrestritos. Já Porto et al. (2002) divide em técnicas analíticas, que buscam a solução por equações e derivadas, e em técnicas de busca numérica, que se utiliza de métodos numéricos para tal.

Entretanto, algumas dificuldades podem ser encontradas na resolução de problemas em PNL. Caso a função objetivo 'f' tenha mais de uma solução ótima local, como mostrado nos

pontos A e B da Figura 5, ou as restrições induzam soluções locais, como mostra o ponto C, a técnica adotada deve ser capaz de localizar o ponto ótimo, ou seja, o mínimo ou máximo global (RAO, 2009).

Figura 5 - Função Objetivo com Mínimos Locais



Fonte: Rao, 2009.

Em algumas situações a não linearidade do problema leva a soluções que não são necessariamente o ponto ótimo global, em vez disso a solução é direcionada para um ponto de ótimo local. Além disso, determinados tipos de problemas levam a situações onde é difícil se convergir para uma solução ótima (PORTO et al., 2002).

2.1.3. A Linguagem de Programação JULIA

Algoritmos para modelagem para simulação e otimização de sistemas, inclusive de reservatórios, pode ser implantado em diversas linguagens de programação, a exemplo do FORTRAN, Matlab, Python, dentre outras. Entretanto algumas linguagens oferecem determinadas dificuldades, sejam elas na implementação do código, obtenção de licenças ou velocidade de processamento.

A comunidade científica requer alta performance, ou seja, pequenos intervalos de processamento e alta velocidade, mas grandes nomes da área preferem linguagens dinâmicas com baixo desempenho. Para resolver este problema a Linguagem Julia foi desenvolvida, com auxílio da compilação *Just in Time (JIT)* como uma programação apropriada para computação

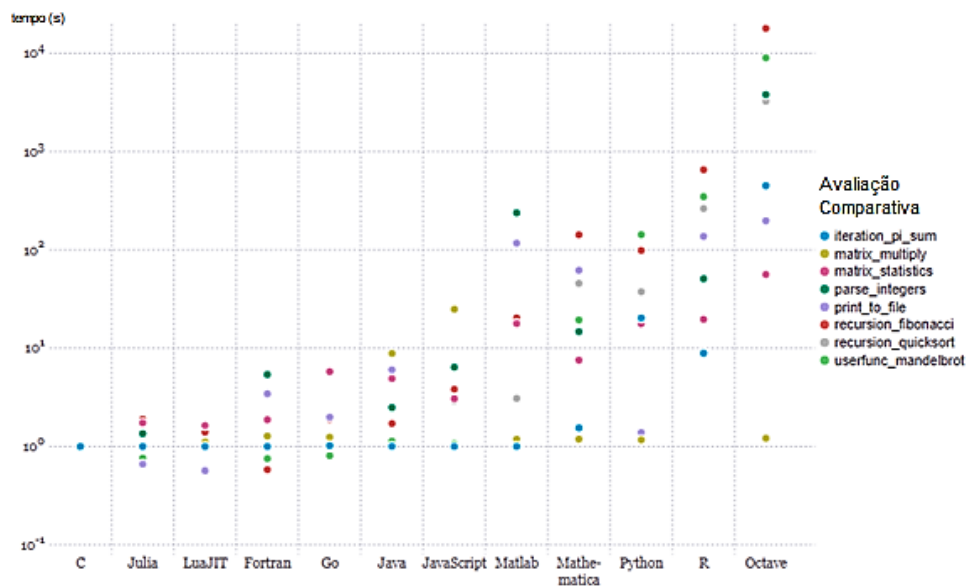
numérica e científica e com desempenho comparável às linguagens estáticas mais tradicionais (BEZANSON et al., 2013).

As características mais significativas do Julia são:

- A biblioteca padrão é toda escrita utilizando a própria linguagem;
- Grande variedade de *types* para descrever objetos e variáveis, sem a necessidade de declará-los;
- Bom desempenho, equiparável a linguagens compiladas como C e FORTRAN;
- Software Livre e *open source* (Licença MIT, aberta para comunidade pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT));
- Boa conversação com códigos em outras plataformas e metaprogramação.

Na Figura 6 é apresentado o desempenho do Julia em comparação a diferentes linguagens quanto ao tempo de processamento quando executados diferentes algoritmos.

Figura 6 – Comparação em tempo de processamento entre Julia e Outras Linguagens

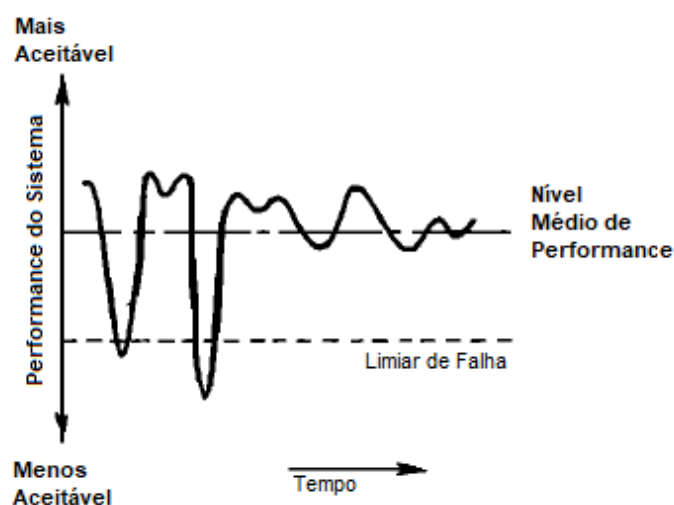


Fonte: Adaptado de julia.org, 2017.

2.2. ÍNDICES DE DESEMPENHO

O modo de avaliação do desempenho de alguns sistemas de recursos hídricos geralmente se baseia na média e variância das saídas do sistema. Mas estas estatísticas descrevem muito vagamente o comportamento do sistema já que se tratam apenas do comportamento médio ou desvio médio quadrático dos parâmetros, como mostrado na Figura 7, estes parâmetros não conseguem estimar o quão severo foi o evento crítico, nem sua duração (HASHIMOTO; STEDINGER e LOUCKS, 1982).

Figura 7 - Representação dos Parâmetros Usuais de Comportamento do Sistema



Fonte: Adaptado de Hashimoto; Stedinger e Loucks, 1982.

Entretanto, sistemas complexos dependem de critérios mais sofisticados como, por exemplo, os índices de desempenho. O desempenho do sistema pode ser descrito com base em três critérios: Confiabilidade, Vulnerabilidade e Resiliência. Estes índices levam em conta que os eventos são estacionários estocásticos, o que pode ser assumido num horizonte de planejamento de recursos hídricos (HASHIMOTO; STEDINGER e LOUCKS, 1982).

A metodologia apresentada no presente texto foi abordada por Hashimoto; Stedinger e Loucks (1982).

2.2.1. Confiabilidade

A confiabilidade leva em conta a frequência de falhas do sistema. Pode-se considerar $X_{j,t}$ como a variável de saída no tempo $t = 1, 2, \dots, n$ do reservatório $j = 1, 2, \dots, m$. O valor da variável pode ser dividido em dois grupos, o grupo S que agrupa o número de resultados satisfatórios e o grupo F que representa o número de vezes que o sistema apresentou falhas. A confiabilidade do sistema é dada pela Equação 9.

$$\alpha_j = \text{Probabilidade} [X_{j,t} \in S_t] \quad (9)$$

onde α_j representa o valor da confiabilidade.

Alternativamente, Silva (2017) apresenta o índice de confiabilidade como apresentado pela Equação 10.

$$\alpha_j = \frac{\text{nº de intervalos com eventos satisfatórios}}{\text{nº total de intervalos de tempo}} \quad (10)$$

2.2.2. Resiliência

A resiliência descreve o quão rápido o sistema consegue se recuperar de períodos de falhas. Caso o sistema leve muito tempo para sair de situações críticas, o que ocasionaria mais danos aos usuários, os valores de resiliência seriam pequenos. Entretanto, se o sistema se recuperar rapidamente, ou seja, sair da zona crítica com rapidez, os danos podem não ser abrangentes e o valor do índice aumenta.

Considerando-se ρ_j como a probabilidade de falha do sistema, ou seja, de passar de um período satisfatório para um não satisfatório, como dado pela Equação 11.

$$\rho_j = \text{Probabilidade} [X_{j,t} \in S, X_{j,t+1} \in F] \quad (11)$$

Têm-se γ_j como a medida de resiliência dada pela Equação 12.

$$\gamma_j = \frac{\text{Probabilidade} [X_{j,t} \in F, X_{j,t+1} \in S]}{\text{Probabilidade} [X_{j,t} \in F]} = \frac{\rho_j}{1 - \alpha_j} \quad (12)$$

Alternativamente, Silva (2017) apresenta o cálculo do índice de resiliência como mostrado pela Equação 13.

$$\gamma_j = \frac{\text{nº de valores na zona insatisfatória e em seguida na zona satisfatória}}{\text{nº de valores na zona insatisfatória}} \quad (13)$$

2.2.3. Vulnerabilidade

Este índice se refere à magnitude da falha, quando esta ocorre. Entende-se que cada valor $X_{j,t}$ é destinado para atendimento da demanda $D_{j,t}$. A vulnerabilidade é dada então pelo índice v_j , definido por Silva (2017) e apresentado pela Equação 14. Além disso o índice pode variar entre $0 \leq v_j \leq 1$.

$$v_j = \frac{1}{\text{nº de falhas}_j} \sum_{t=1}^n \left| \frac{D_{j,t} - X_{j,t}}{D_{j,t}} \right| \quad (14)$$

2.3. BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

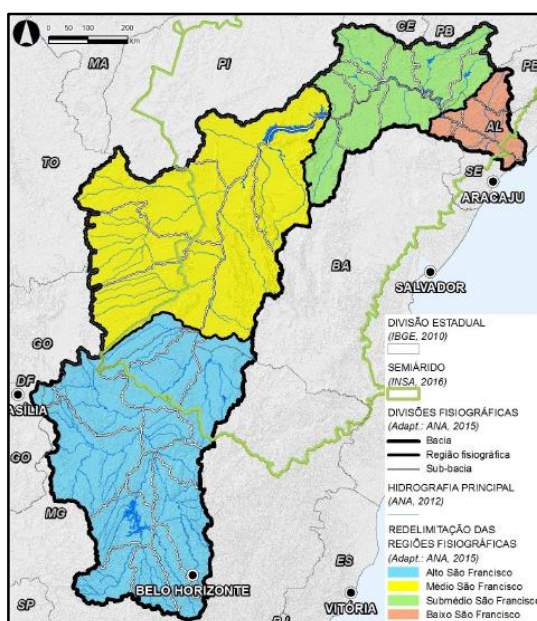
A BHSF corresponde a 8% do território brasileiro, uma das principais regiões hidrográficas do país. O rio principal, com 2863 km e área de drenagem de 639.219 km², estende-se de sua nascente na Serra da Canastra – MG até a sua foz, na divisa entre os estados de Sergipe e Alagoas. Em sua área de contribuição, a bacia do São Francisco abrange 505 municípios e os estados de Minas Gerais (235.635 km²), Goiás (3.193 km²), Bahia (307.794 km²), Pernambuco (68.966 km²), Alagoas (14.687 km²), Sergipe (7.024 km²) e o Distrito Federal (1.277 km²) (MMA/ANA/CBHSF/AGB Peixe Vivo/GAT/NEMUS, 2016).

2.3.1. Descrição da Bacia

A região da BHSF encontra-se atualmente dividida em 4 regiões: Alto São Francisco (SFA), com 40% da área da bacia; Médio São Francisco (SFM), com 39%; Submédio São Francisco (SFSM), com 17% e Baixo São Francisco (SFB), com 5% da área total. A Figura 8 mostra a localização da bacia e a sua subdivisão (MMA/ANA/CBHSF/AGB Peixe Vivo/GAT/NEMUS, 2016).

A densidade demográfica na bacia é de 20,0 hab/km², superando a média brasileira de 19,8 hab/km² (IBGE, 2000). Na região do Alto São Francisco, se destaca a população urbana com cerca de 93% de urbanização, principalmente pela capital de Minas Gerais, Belo Horizonte (MMA, 2006). Em geral, a maior parte da população (77%) reside em áreas urbanas, chegando a 71,7 hab/km² na região da nascente (MMA/ANA/CBHSF/AGB Peixe Vivo/GAT/NEMUS, 2016).

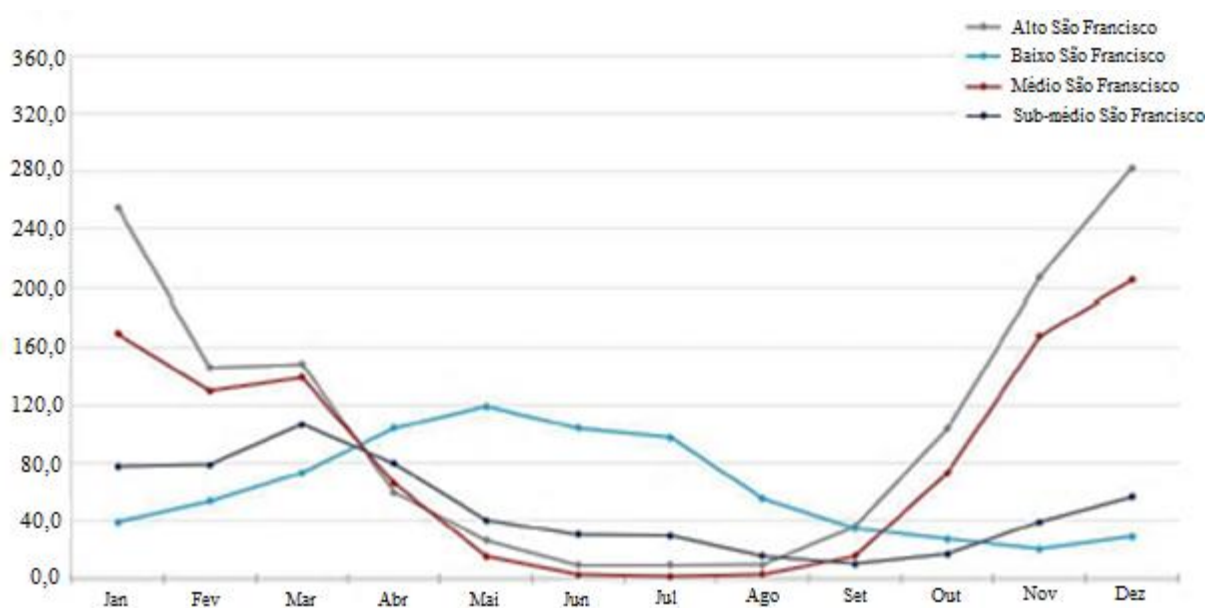
Figura 8 - Representação da Divisão da BHSF



Fonte: ANA, 2016.

Analisando-se diversos parâmetros climatológicos, observa-se que existem tendências semelhantes entre o clima do Alto (clima quente e úmido, chuvas de verão) e Médio São Francisco (semiárido), e entre o Submédio (semiárido) e Baixo SF (quente e úmido, chuvas de inverno). A temperatura oscila entre 33°C e 11°C, a depender da sub-região e altitude. No quesito precipitação, varia de 1400 mm/ano no Alto SF e 400 mm/ano no Submédio SF, como pode ser visto na Figura 9 (MMA/ANA/CBHSF/AGB Peixe Vivo/GAT/NEMUS, 2016).

Figura 9 - Ciclo Interanual de Precipitação Acumulada (1961-2014)



Fonte: INMET, 2015.

O uso do solo pode variar de sub-região para sub-região. Mas em geral destaca-se o uso do solo da região para uso agrícola, como por exemplo estabelecimentos agropecuários e pastagens. A Tabela 1 apresenta um resumo do uso do solo por sub-região (MMA/ANA/CBHSF/AGB Peixe Vivo/GAT/NEMUS, 2016).

Tabela 1 - Uso do Solo por Região Fisiográfica, em % (2010)

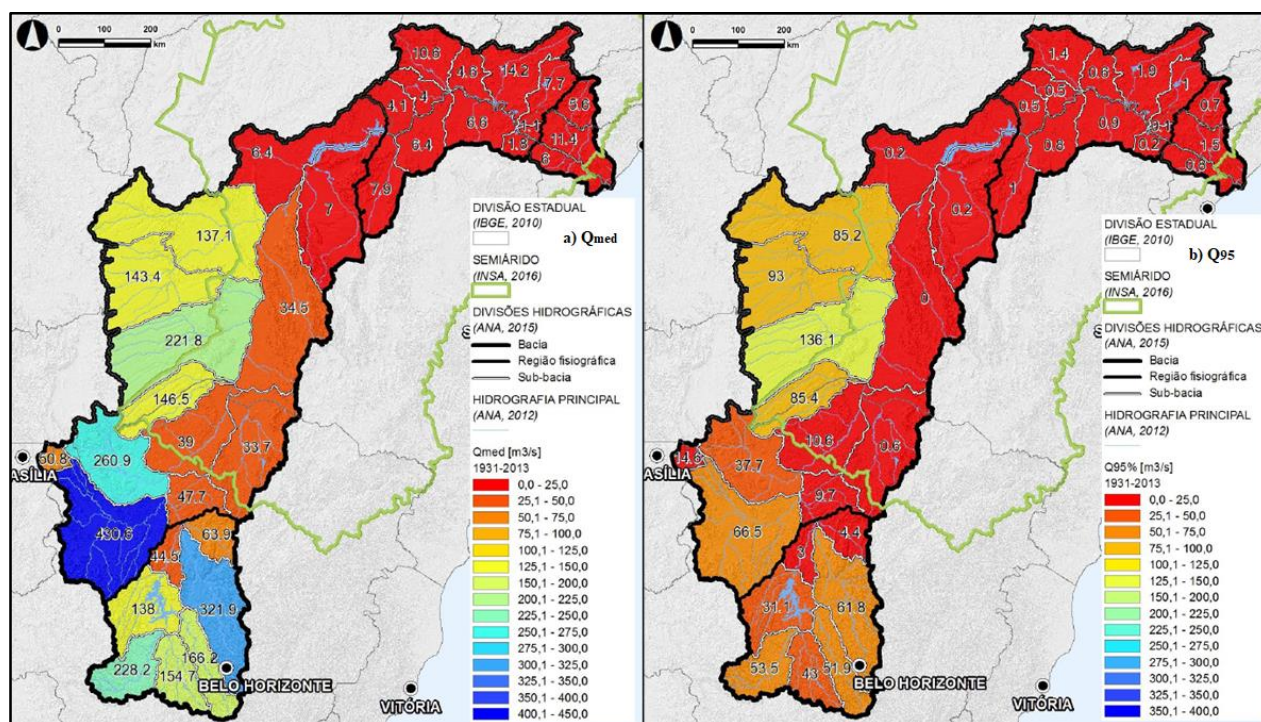
Grandes grupos de uso do solo	SFA	SFM	SFSM	SFB	BHSF
Área urbanizada	3,3	0,3	0,7	1,0	0,9
Lavouras	1,9	5,6	1,6	5,4	4,3
Matas e/ou florestas	5,4	11,7	7,9	2,4	9,7
Pastagens	32,5	17,8	8,6	52,6	19,9
Estabelecimentos Agropecuários	44,5	57,6	72,8	27,1	56,9
Outros/Diversos	12,3	7,1	8,4	11,5	8,3

Fonte: IBGE, 2014.

2.3.2. Disponibilidade Hídrica – Águas Superficiais

Um estudo hidrológico foi feito para determinar a disponibilidade hídrica da BHSF, o qual estimou a vazão média, Q_{med} , de 2.769 m³/s e uma vazão de permanência, Q_{95} , de 800 m³/s. Estes valores são ligeiramente inferiores aos do Plano Decenal (2004-2013) que eram de 2.844 m³/s para Q_{med} e 854 m³/s para Q_{95} . A Figura 10 mostra a disponibilidade hídrica na região do RSF (MMA/ANA/CBHSF/AGB Peixe Vivo/GAT/NEMUS, 2016).

Figura 10 - Disponibilidade Hídrica na Bacia do São Francisco. a) Q_{med} , b) Q_{95}



Fonte: NEMUS, 2016

2.3.2.1. Eventos Críticos: a seca na região do São Francisco

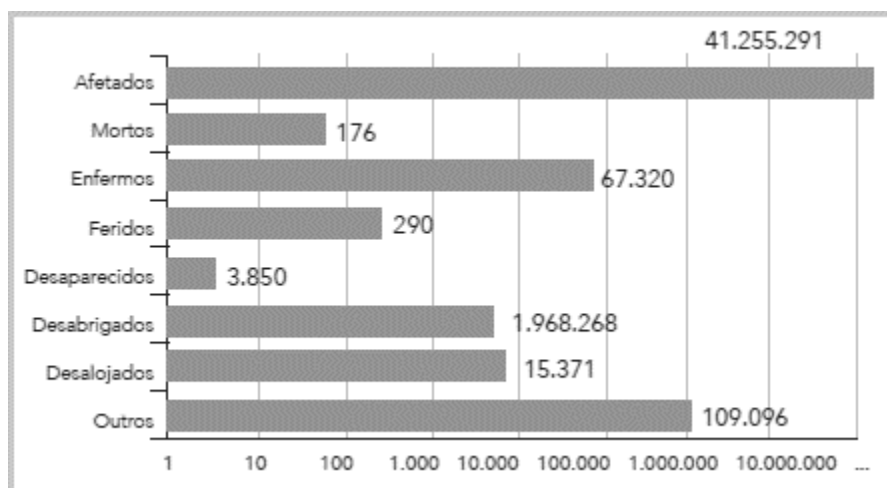
Mais da metade da região da BHSF encontra-se no semiárido (57%) e se caracteriza pela distribuição irregular dos baixos níveis de precipitação e, consequentemente, baixa disponibilidade hídrica (CGEE/ANA, 2012). Em decorrência disso, o SFSM e SFB, que pertencente à Região Nordeste, sofrem com as consequências dos eventos de seca, como mostrado pela Figura 11, que apresenta os danos à população (CEPED – UFSC, 2013).

Segundo o ONS (2015), o sistema do SF passa pela pior seca da história de afluência dos rios (1931 – 2014). Já no ano de 2015 ainda se observa a permanência das condições críticas, ou seja, a bacia passa por sua pior crise, superando em severidade a seca de 2001.

O histórico de eventos de seca demonstra que não se trata de um problema recente, uma vez que foram registradas secas nos períodos de 1915-1919, 1930-1932, 1942, 1970, 1976,

1979-1983, 1987-1988, 1993, 1998-1999, 2001-2003 e 2007-2009 (MMA, 2004; CEPED-UFSC,2011).

Figura 11 - Danos Humanos médios por Estiagem e Seca - Região Nordeste

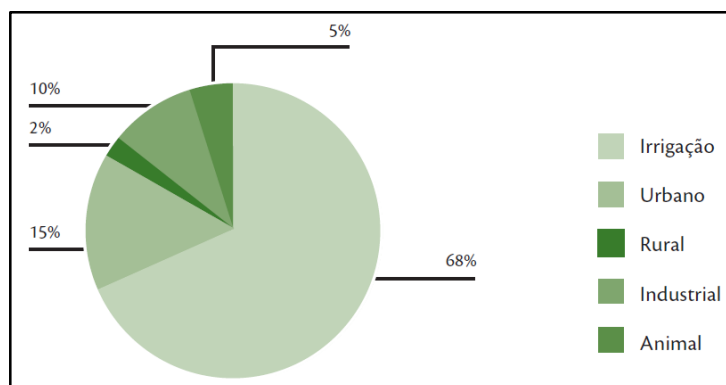


Fonte: Brasil, 2013.

2.3.3. Usos Múltiplos

A BHSF, como a maioria das bacias brasileiras, é explorada por diversos setores de diferentes formas a depender da sub-região, o que torna o conceito de usos múltiplos e concorrentes um desafio para gestão dos recursos hídricos (CGEE/ANA, 2012). Os usos podem ser divididos em consuntivos e não consuntivos. Os usos consuntivos englobam o abastecimento público, uso industrial, agropecuária e irrigação. Já os usos não consuntivos são a diluição de nutrientes, geração de energia, mineração, navegação, pesca, aquicultura, turismo, recreação e navegação (NEMUS, 2015). A Figura 12 mostra a distribuição de demanda na bacia.

Figura 12 - Distribuição da Demanda Hídrica da BHSF



Fonte: ANA, 2011.

2.3.3.1. Abastecimento Urbano

O RSF é uma das principais alternativas de abastecimento para os municípios situados na região semiárida. Além disso, a Região Metropolitana de Belo Horizonte, única Capital inteiramente situada na bacia, é um centro consumidor que demanda grandes vazões (ANA, 2013). A demanda de abastecimento público é responsável pela retirada de aproximadamente 26,0 m³/s dos mananciais superficiais que alimentam o RSF (MENDES, 2012).

O RSF é um dos mais importantes mananciais brasileiros, atendendo a cerca de 128 sedes municipais. Além disso, o rio é usado como garantia de demanda hídrica já que a intermitência dos rios no semiárido não garante atendimento durante todo o ano (NEMUS, 2015). Soma-se o fato que, conforme o artigo 1º da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, em situações de escassez, o uso prioritário deve ser para consumo humano e dessedentação de animais (BRASIL, 1997).

2.3.3.2. Irrigação, Dessedentação Animal e Agropecuária

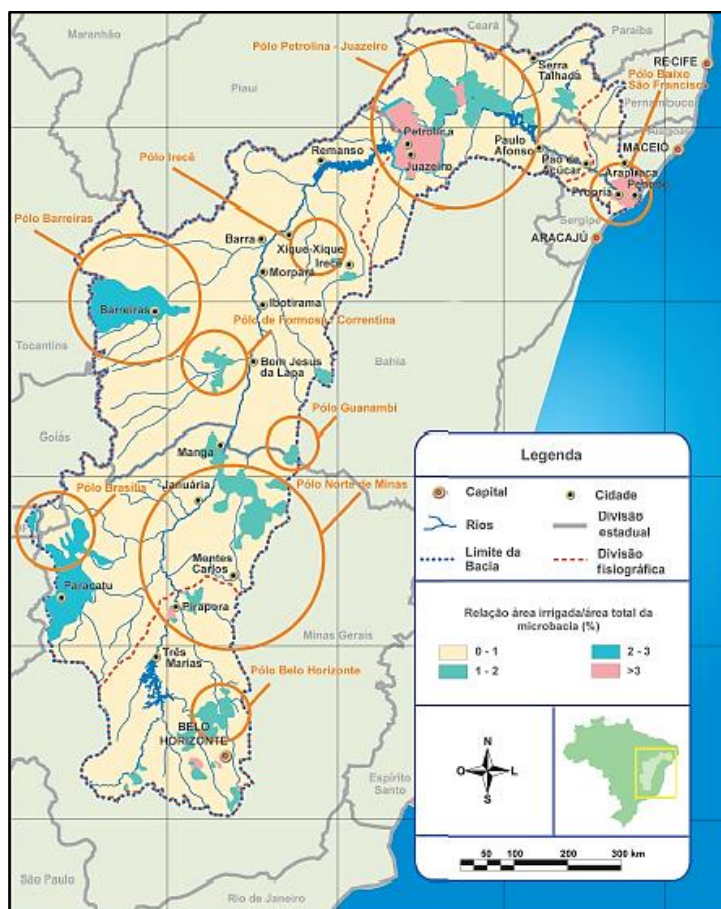
No caso da BHSF, as retiradas de água para agricultura representam cerca de 14% da demanda nacional (CGEE/ANA, 2012). Atividades deste tipo chegam a corresponder a 69% da vazão total retirada do rio, alcançando 114,0 m³/s. Dentre os principais cultivos se destaca a fruticultura, hortaliças, horticultura, rizicultura e a plantação de grãos, cana-de-açúcar, milho, feijão, café e algodão (NEMUS, 2015).

Em 2015 a área irrigada na bacia era cerca de 807.389 ha (NEMUS, 2015), com cerca de 130.000 hectares pertencente a projetos públicos, já as atividades privadas destacam-se no oeste baiano com a irrigação de 145.701 hectares por pivôs centrais, além das regiões do Distrito Federal e Minas Gerais. Destacam-se ainda, na região do semiárido, projetos públicos/privados a exemplo da região de Juazeiro e Petrolina. (CGEE/ANA, 2012).

A agricultura familiar também se destaca neste cenário, ocupando cerca de 9,9 milhões de hectares, entretanto estima-se que apenas cerca de 260 mil hectares podem ser efetivamente aproveitados para a agricultura. A demanda desta área pode se aproximar de 36 m³/s, considerando-se também os planos de revitalização feitos pela Codevasf e financiados pelo PAC (NEMUS, 2015).

Em relação aos métodos de irrigação, destaca-se o uso de pivôs centrais, aspersão convencional, micro aspersão e irrigação por superfície (NEMUS, 2015). A Figura 13 apresenta a relação área irrigada dividida pela área do município em 2015.

Figura 13 - Relação Área Irrigada / Área Municipal



Fonte: ANA, 2005a.

A criação de animais é bem evidente na bacia, em destaque para o gado bovino, correspondente a 61,5%, caprino com 14,8% e ovino com 14,6%, mas as retiradas, quando comparadas aos outros usos, não representam grandes percentuais, estima-se valores de 1,8 m³/s (NEMUS, 2015).

2.3.3.3. Indústria

O estado de Minas Gerais se destaca pela maior concentração de indústrias, mas vale ressaltar que existem, em menores quantidades, indústrias por toda bacia. Segundo NEMUS (2015) a indústria se apresenta como uma das principais atividades econômicas do SFA, SFM e SFSM. A distribuição industrial é feita da seguinte forma:

- SFA – indústrias de siderurgia, usinas de açúcar e etanol, cimento e automobilística;
- SFM – usinas de produção de açúcar, etanol, biodiesel, óleos vegetais e cimenteiras, têxtil, agroindustrial, farmoquímico e biotecnológico;
- SFSM – usinas de açúcar, etanol, óleos vegetais, cimenteiras e agroindústria;
- SFB – indústrias sucroalcooleiras, cimenteiras e de laticínios.

As atividades industriais demandam grandes volumes de água para as diferentes etapas de seus processos. Segundo Mendes (2012) o SFA demanda cerca de 90% das retiradas para uso industrial da bacia. A Tabela 2 apresenta a vazão retirada e as outorgas para uso industrial.

Tabela 2 - Outorgas e Retiradas para Abastecimento Industrial

Região fisiográfica	Demandas para "Abastecimento industrial"	
	Vazão de retirada (m ³ /s)	%
Alto	17,9	90%
Médio	0,9	4%
Submédio	0,6	3%
Baixo	0,4	2%
Total	19,8	100%

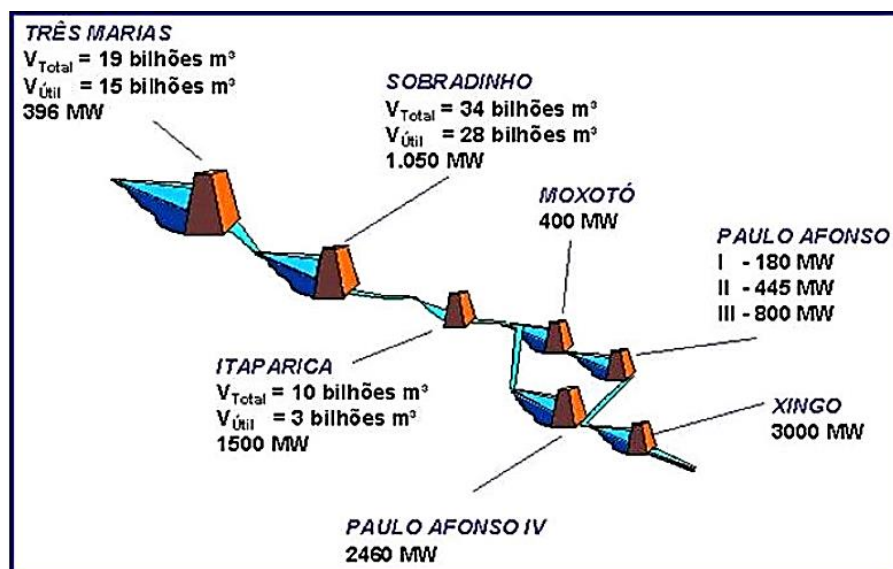
Fontes: ANA, 2013/INEMA, 2015/ IGAM, 2015/ APAC, 2015/ SEMARH – AL, 2015/ SEMARH – SE, 2015/ ECOPLAN, 2012.

2.3.3.4. Geração de Energia

O aproveitamento das quedas para geração de energia elétrica é uma das principais atividades realizadas na BHSF. Em 2005 ela gerava cerca de 10% do total brasileiro (CGEE/ANA, 2012). Existem atualmente 65 unidades geradoras de eletricidade instaladas no leito do RSF e seus afluentes. Elas são divididas em 16 UHE, com mais de 30 MW de potência; 26 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), com potência entre 1,1 e 30 MW e 23 Centrais Geradoras Hidroelétricas, com no máximo 1MW de potência. (ANEEL, 2015 e 2017).

Além da geração de energia elétrica, os reservatórios de Sobradinho, Itaparica e Três Marias promovem o controle de cheias, alterando o ciclo hidrológico da bacia. (CGEE/ANA, 2012). A Figura 14 mostra esquematicamente a distribuição das principais unidades geradoras pela calha do rio.

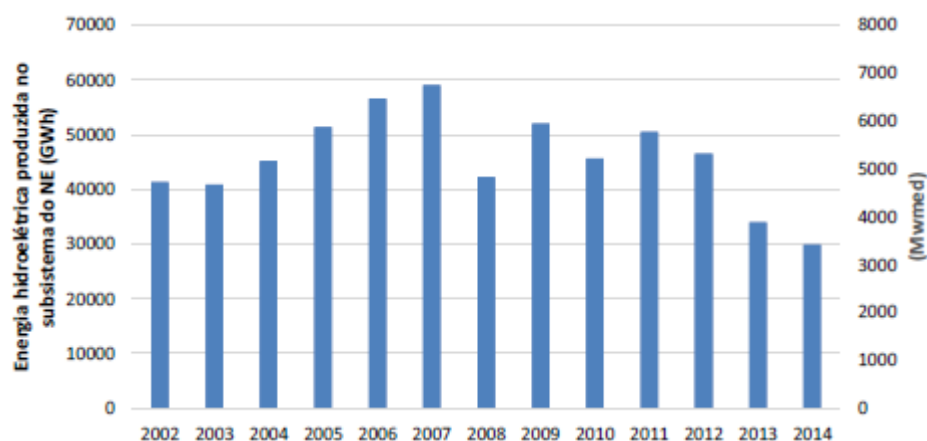
Figura 14 - Distribuição das Principais UHE na Calha do RSF



Fonte: ANA et al., 2004.

As usinas instaladas na calha do RFS são fontes importantes de suprimento para o Sistema Interligado Nacional (SIN), principalmente nos subsistemas Nordeste e Sudeste/Centro Oeste (NEMUS, 2015), entretanto, a crise hídrica que ocorre na região afeta gravemente a produção de Energia Elétrica, como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Produção de Energia Hidrelétrica no Nordeste



Fonte: ONS, 2015.

2.3.3.5. Usos não consuntivos

Além dos usos consuntivos, as águas da BHSF são usadas para outros fins. Existem alguns trechos passíveis de navegação no SFM (1371 km) e SFB (208 km), além da pesca, e de atividades turísticas, proporcionadas pela diversidade de sítios arqueológicos, locais históricos e paisagens naturais (CGEE/ANA, 2012).

2.3.4. Projetos de Integração de Bacias

Por ser um bem essencial para o desenvolvimento humano, econômico e social o uso e distribuição da água geram vários conflitos de interesses. Os quais podem ser evidenciados em regiões com alta disponibilidade hídrica que nem sempre são apresentadas as mais altas demandas. Uma das maneiras de resolver este impasse reside na transferência de águas tanto dentro de uma bacia quanto entre bacias distintas. Projetos deste tipo já foram executados no Antigo Egito, China, EUA e no Império Romano, além disso, existem vários sistemas em funcionamento, inclusive no território brasileiro (CGEE/ANA, 2012).

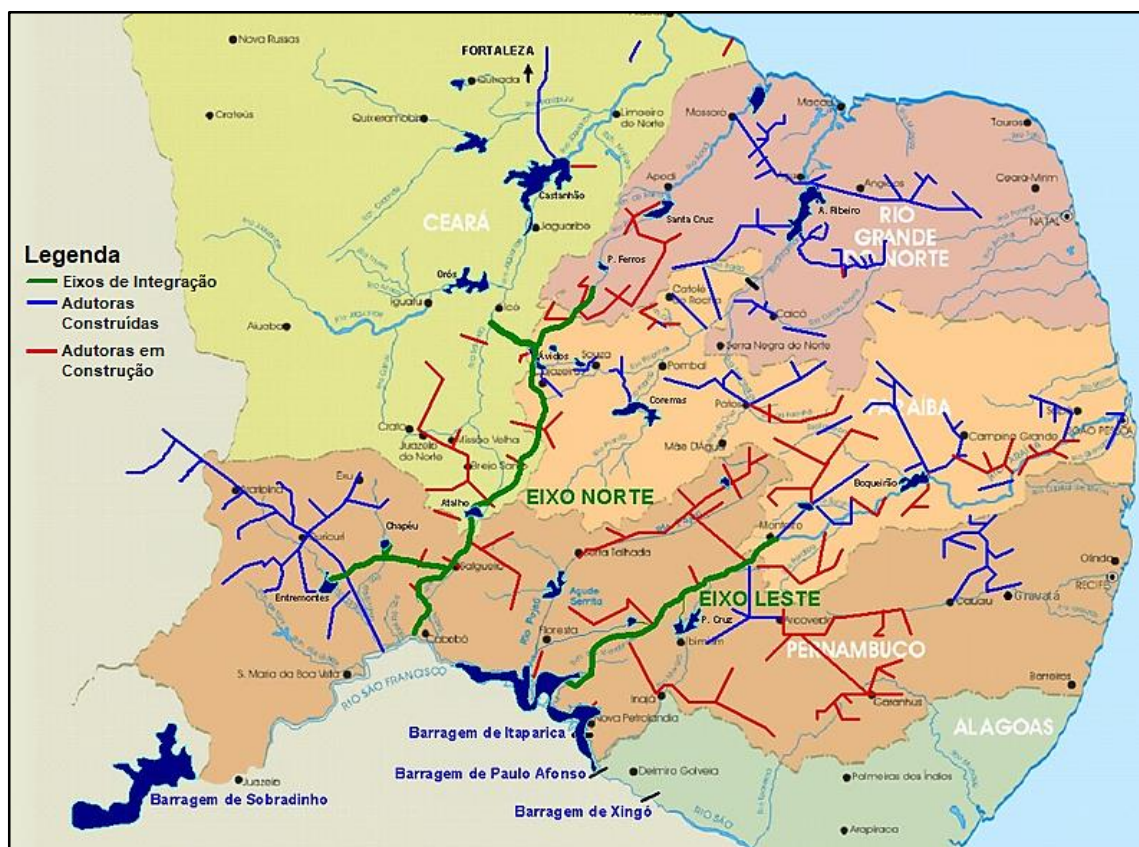
Atualmente, os projetos de integração têm como objetivo a garantia de segurança hídrica, ou seja, a garantia de suprimentos por meio da operação otimizada, tanto dos sistemas fornecedores quanto dos sistemas receptores de água. Condições ainda mais difíceis diante dos processos de mudanças climáticas e aumento de eventos extremos evidenciados nas últimas décadas (CGEE/ANA, 2012).

2.3.4.1. Transposição para o Nordeste Setentrional

Um grande exemplo do descompasso entre disponibilidade e consumo é a região Nordeste, que concentra 28% da população brasileira e detém apenas 3% dos recursos hídricos nacionais. No semiárido nordestino, as médias de pluviosidade anuais não superam 800 mm e a má distribuição das chuvas em alguns meses faz com que se construam açudes para reservação de água. Mas, a evaporação acentuada e a geologia cristalina favorecem o acúmulo de água, seja sobre ou sob a superfície (CGEE/ANA, 2012).

Diante deste contexto enquadra-se o Projeto de Integração do São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF), que consiste na construção de dois eixos, Norte e Leste, além de estruturas para retirada, bombeamento e transporte de água. Ele visa transpor as águas do SF para algumas bacias hidrográficas dos estados de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará, atendendo cerca de 66.500 km² e beneficiando 89 municípios (CGEE/ANA, 2012). O projeto pode ser contemplado na Figura 16.

Figura 16 - Projeto de Integração do rio São Francisco (PISF)



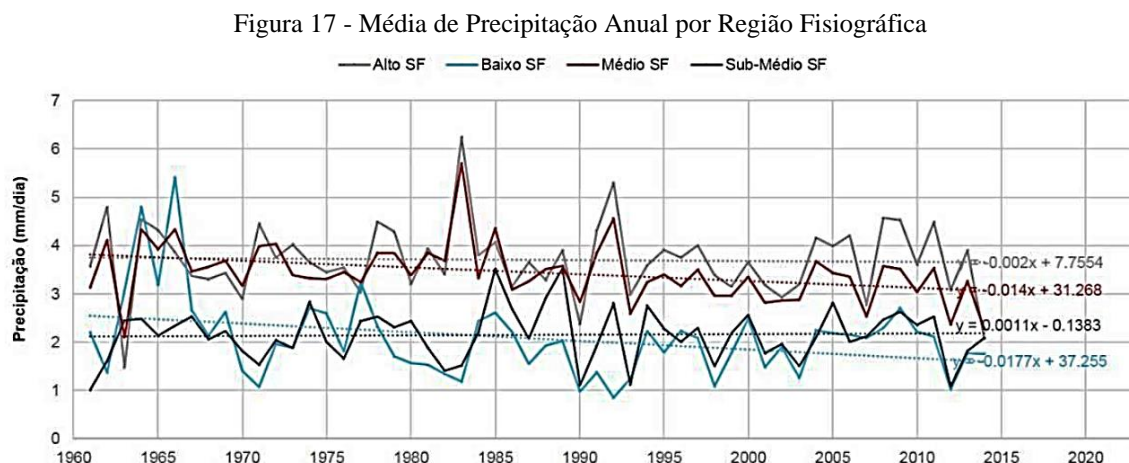
Fonte: Ministério da Integração Nacional, 2017.

Em termos de capacidade hidráulica, os canais, túneis e aquedutos foram projetados para comportar uma vazão máxima de até $127 \text{ m}^3/\text{s}$ (CGEE/ANA, 2012) entretanto a ANA apenas concedeu outorga de $26,4 \text{ m}^3/\text{s}$ para o projeto, entretanto, pode chegar a sua capacidade máxima em detrimento da ocorrência de vertimento na barragem de Sobradinho (ANA, 2005b).

2.3.4.2. Reforço das Bacias do Tocantins e Paraná

Conforme já apresentado, a redução das vazões do RSF é uma ameaça tanto para geração de energia, quanto para atendimento aos usos consuntivos e não consuntivos. Uma solução defendida por Molion (2003) é a transposição de água de afluentes do Tocantins e do Paraná.

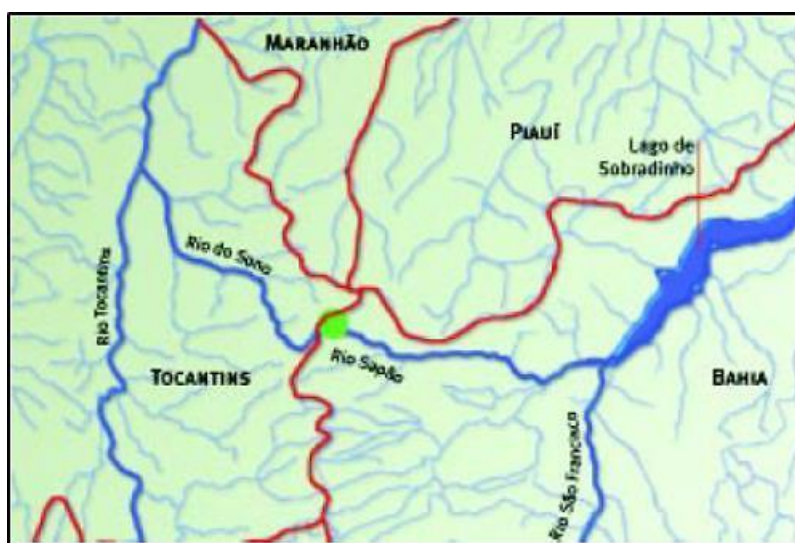
Como apresentando na Figura 17, verifica-se a redução das médias pluviométricas a medida que a média da vazão do RSF também vem caindo nos últimos 20 anos. Fato este que, somado às demandas cada vez maiores, acabam agravando ainda mais a situação dos reservatórios ao longo da bacia.



O rio Tocantins apresenta altas vazões médias mensais, atingindo cerca de 4.118 m³/s. Como mostrado na Figura 18, a interligação entre o rio do Sono e rio Sapão poderia ser realizada por um canal com cerca de 150 km localizado na região em destaque na ilustração, ou seja, a interligação entre os afluentes do Tocantins e São Francisco é possível. Vale ainda ressaltar que em períodos de cheia do rio Tocantins, ocorre naturalmente transposição subsuperficial natural de cerca de 80 a 110 m³/s para a BHSF na região da lagoa do Varedão (MOLION, 2013).

Portanto, o impacto da geração de energia elétrica na calha do rio Tocantins não seria alto, já que apenas a UHE de Lajeado seria afetada e compensada pelo aumento de produção na calha do SF. Além disso, Tucuruí chega a verter cerca de 32 mil hm³, vazão que poderia ser usada para reforçar Sobradinho (MOLION, 2013).

Figura 18 - Região de Possível Comunicação entre os rios Sapão e do Sono



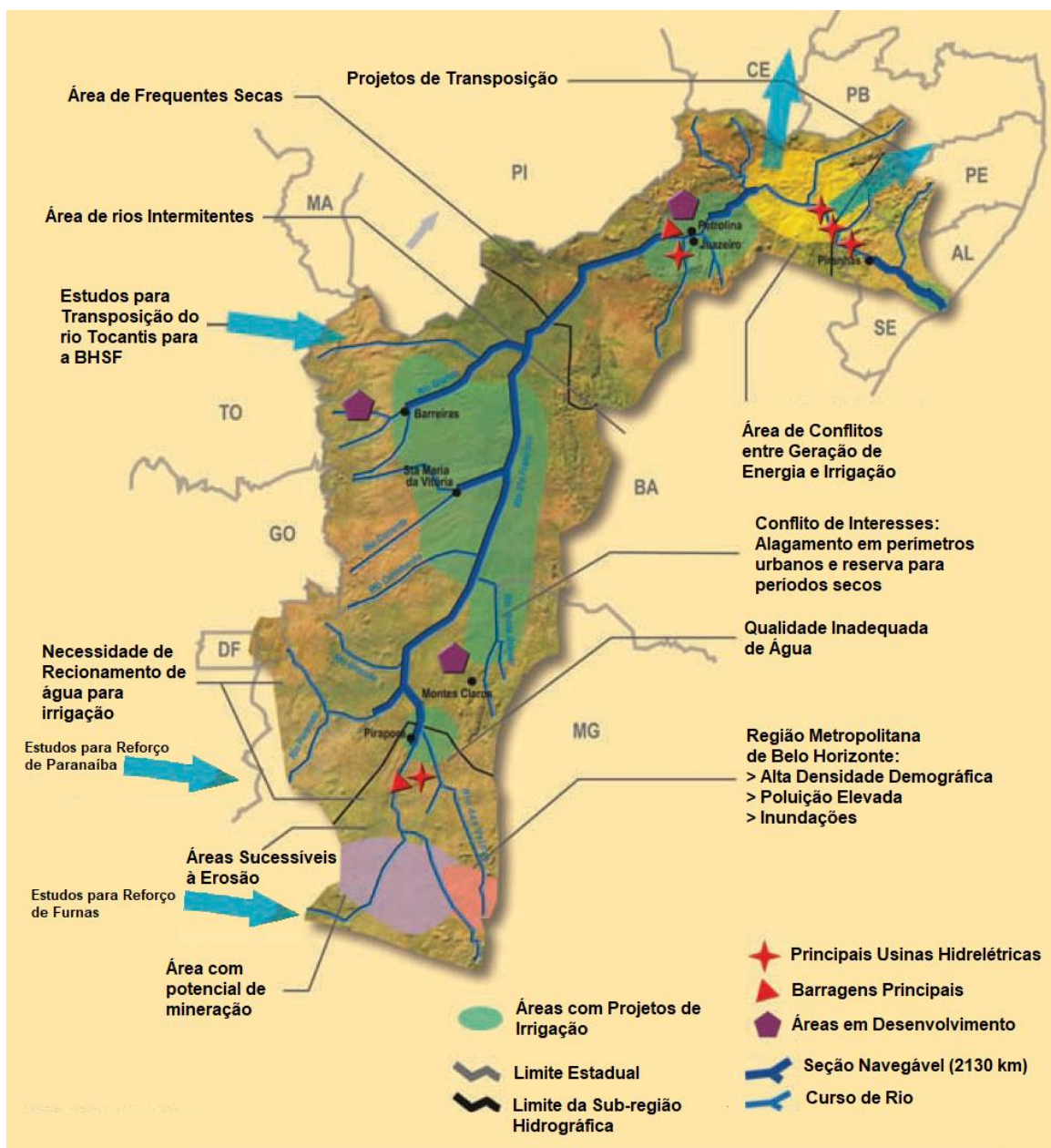
Fonte: Molion, 2013.

Mendes (2012) afirma que a Codevasf prevê ainda reforços vindos das bacias de Furnas e Parnaíba, situadas na Região Hidrográfica do Rio Paraná. O reforço do Tocantins seria de

51,37 m³/s, seguido de 392,88 m³/s de Furnas e 224,50 m³/s do Parnaíba, portanto o reservatório de Sobradinho receberia aproximadamente 258 m³/s e Três Marias 392,88 (CODEVASF, 2017).

A Figura 19 mostra em suma todas as regiões de conflito e os projetos, tanto de transposição quanto de reforço.

Figura 19 - Resumo das Trechos Navegáveis, Projetos de Integração e Zonas de Conflito



Fonte: Adaptado de CGEE, 2009.

3. METODOLOGIA

3.1. DEFINIÇÃO DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO

A linguagem de programação escolhida para implementar o algoritmo de otimização foi a Julia. Decidiu-se por uma linguagem de alto nível, fácil uso, *software* livre e de código aberto. Além disso, o pacote IDE Atom, facilita a programação, oferecendo versatilidade ao programador. Por ter uma plataforma de fácil entendimento, ele funciona como mediador entre o usuário e o do código Julia. Como *solver* para a PNL utilizou-se o *Ipopt*, pertencente ao pacote *JuMP*, disponível para Julia e outras plataformas, com amplo espectro de solução de problemas de otimização e também com licença para uso livre.

3.2. LEVANTAMENTO DE DADOS

3.2.1. Dados de Vazão Natural

Vazão natural é a vazão do rio adicionada de todos os usos, ou seja, é a vazão teórica de deveria escoar pelo leito do rio se não houvesse nenhum uso consuntivo e regularização de vazão a montante. A série do RSF de vazão natural afluente aos reservatórios da BHSF está disponibilizada pelo ONS (2017).

3.2.2. Definição e Levantamento de Dados das UHE

As Usinas de Retiro Baixo, Queimado, Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso/Moxotó e Xingó foram destacadas por Mendes (2012) como mais influentes no regime hídrico do RSF, portanto foram escolhidas para a modelagem.

Dados de nível de água máximo e mínimo do reservatório (h_{\max} e h_{\min}), volume armazenado máximo e mínimo (S_{\max} e S_{\min}), vazão turbinada máxima (Q_{turbmax}), polinômios de cota/volume para os reservatórios, cota/vazão vertida ou cota/vazão turbinada para os canais de jusante e área/volume armazenado para cada reservatório foram retirados do programa *HydroEdit* disponibilizado pelo setor elétrico através da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2017) e apresentados pela Tabela 3.

Tabela 3 - Dados das UHE

Nome da UHE	Código	hmax (m)	hmin(m)	Smax (hm ³)	Smin(hm ³)	Qturbmax (m ³ /s)	C. Prod. E. (MW/m ³ /s/m)
Retiro Baixo	155	616.0	614.0	241.59	200.72	123.12	0.008755
Três Marias	156	572.5	549.2	195228.00	4250.00	815.26	0.008564
Queimado	162	829.0	811.0	557.00	95.25	60.36	0.008829
Sobradinho	169	392.5	380.5	34116.00	5447.00	4011.60	0.009023
Itaparica	172	304.0	299.0	10782.00	7234.00	3091.95	0.008931
P. Afonso/Moxotó	176	251.5	251.5	1226.00	1226.00	3741.28	0.009035
Xingó	178	138.0	138.0	3800.00	3800.00	2856.80	0.009119

Fonte: CCEE, 2017.

O programa *HydroEdit* também disponibiliza os dados de evaporação mensal nos reservatórios, cujos valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados de Evaporação Potencial (mm/mês)

Nome da UHE	Código	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Retiro Baixo	155	-21	-14	9	30	45	49	69	83	60	30	1	-12
Três Marias	156	-1	-2	28	47	61	61	58	49	49	35	21	22
Queimado	162	21	4	21	33	59	70	77	79	80	51	17	51
Sobradinho	169	171	109	61	56	108	104	165	203	234	267	245	223
Itaparica	172	163	88	47	35	55	41	81	138	190	227	235	202
P. Afonso/Moxotó	176	163	88	47	35	55	41	81	138	190	227	235	202
Xingó	178	163	88	47	35	55	41	81	138	190	227	235	202

Fonte: CCEE, 2017.

3.2.3. Levantamento de Demandas

3.2.3.1. Uso Consuntivo

Para levantamento das demandas de uso consuntivo foi consultado o arquivo de *metadados* da ANA, disponível no HidroWeb (2017). Os dados estão disponíveis na forma de vazão média anual para cada *ottobacia* brasileira.

Para se calcular a demanda industrial, a ANA usou outorgas de direito de uso da água até 2014 emitida pelos Estados e pela União; para demanda animal, foram usados os dados municipais de rebanho oferecidos para o ano de 2013 (SIDRA/IBGE); a demanda humana considerou estimativas populacionais do IBGE (2013) e a demanda de irrigação foi calculada com base no SPR/ANA, levantamento de pivôs centrais por imagens de satélite (EMBRAPA/ANA) e taxas rurais de crescimento, fornecidas pela Associação Brasileira de Máquinas e Equipamentos.

Para desagregar a demanda média anual, obtida do arquivo de *metadados* da ANA, em demandas médias mensais, assumiu-se que os valores mensais representariam a mesma porcentagem da demanda anual calculada por Mendes (2012). Assim, foram obtidos os valores de demanda média mensal da Tabela 5.

Tabela 5 - Demandas por UHE (m³/s)

NOME	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Retiro Baixo	12.4	24.9	16.0	28.8	19.1	24.9	24.0	21.3	24.1	14.6	10.8	10.5
Três Marias	24.4	49.0	31.6	56.7	37.6	49.0	47.3	41.9	47.5	28.8	21.2	20.5
Queimado	3.6	3.6	11.0	23.4	25.3	19.8	35.4	41.1	43.2	10.5	3.0	3.0
Sobradinho	105.2	129.2	63.7	150.4	156.7	168.4	155.8	186.1	196.0	103.4	37.1	35.4
Itaparica	64.2	51.3	20.1	54.8	56.2	45.8	53.2	65.8	78.4	79.3	80.5	46.7
P. A./Moxotó	0.9	0.8	0.4	0.8	0.8	0.5	0.5	0.7	1.0	1.0	1.1	0.7
Xingó	1.3	1.3	0.9	1.2	1.1	0.7	0.8	0.7	1.1	1.2	1.5	1.0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para a transposição, fixou-se a demanda de 26,4 m³/s, baseado na portaria da ANA.

3.2.3.2. Garantia Física da Usina

Garantia física é a Potência contratada aos agentes geradores pelo Ministério de Minas e Energia (MME). É a quantidade máxima de energia que pode ser produzida para comercialização. (ENGIE, 2017). Para as UHE do sistema, a Tabela 6 mostra a Garantia Física.

Tabela 6 - Garantia Física das UHE do RSF

NOME	Código	Garantia Física (MW)
Retiro Baixo	155	38.50
Três Marias	156	239.00
Queimado	162	58.00
Sobradinho	169	531.00
Itaparica	172	959.00
P. Afonso/Moxotó	176	2225.00
Xingó	178	2139.00

Fonte: Mendes, 2012.

3.2.3.3. Demanda Ambiental

A demanda ambiental é definida pelos órgãos ambientais como a mínima vazão a jusante da UHE para manutenção do habitat e para navegação. Os valores considerados foram citados por Mendes (2012) e apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Demanda Ambiental a Jusante

NOME	Código	Vaz Nat Jus (m³/s)
Retiro Baixo	155	27.67
Três Marias	156	300.00
Queimado	162	8.80
Sobradinho	169	1300.00
Itaparica	172	1300.00
P. Afonso/Moxotó	176	1300.00
Xingó	178	1300.00

Fonte: Mendes, 2012.

3.2.4. Levantamento de Vazões de Reforço

Foram adotados como reforço os valores propostos pela Codevasf, apresentados por Mendes (2012) e que constam na Tabela 8.

Tabela 8 - Vazões de Reforço

Receptor	Bacia Fornecedora	Vaz Ref (m³/s)
Três Marias	Paraná (Reserv. Furnas)	392.88
Sobradinho	Tocantins e Paraná	275.87

Fonte: Mendes, 2012.

3.3. EQUACIONAMENTO

Quando executado, o algoritmo apresentado no Apêndice 1 carrega matrizes de dados referentes à vazão natural afluyente de cada UHE (m³/s) além da evaporação potencial mensal (mm/mês) para os lagos dos reservatórios. Assim, respeitando a equação da continuidade dada pela Equação 15 e usando os polinômios que relacionam cota do reservatório com o volume armazenado e cota do canal de jusante com o volume turbinado juntamente com o vertido, mostrados pela fórmula genérica na Equação 16 e apresentados pelas Tabela 9 e Tabela 10 o código pode fazer a modelagem do sistema.

$$S_{i,j} = S_{i-1,j} - Vol_{evap\ i,j} + [(Q_{nat\ i,j} - Q_{UC\ i,j} - Q_{jus\ i,j} - Q_{transp\ i,j} + Q_{ref\ i,j}) * t] \quad (15)$$

onde $S_{i,j}$ é o armazenamento no mês 'i' e ano 'j' em m³, para a partida, considerou-se os reservatórios como cheios; $Vol_{evap\ i,j}$ é o volume evaporado em m³; $Q_{nat\ i,j}$, $Q_{UC\ i,j}$, $Q_{jus\ i,j}$, $Q_{transp\ i,j}$ e $Q_{ref\ i,j}$ são: vazão natural a jusante, demanda de uso consuntivo, vazão a jusante, vazão para transposição e vazão do reforço, em m³/s, o que justifica o uso do termo 't' que é uma matriz considerando os tempos em segundos para cada mês do ano.

$$h_{i,j} = A_0 + A_1 \cdot S_{i,j} + A_2 \cdot S_{i,j}^2 \quad (16)$$

onde $h_{i,j}$ é a altura a ser encontrada, em metros; A_0 , A_1 e A_2 são os coeficientes da variável $S_{i,j}$, que representa o volume armazenado, ou substituída pela $Q_{jus\ i,j}$.

Tabela 9 - Coeficientes da Equação cota versus Q_{jus}

Código UHE	A0	A1	A2
155	576,22	0,0307	1,00E-04
156	514,66	0,0016	2,00E-07
162	636,50	0,0173	-2,00E-05
169	360,59	0,0012	7,00E-08
172	251,50	0,0000	0,00E+00
176	138,00	0,0000	0,00E+00
178	13,79	0,0018	2,00E-07

Fonte: Adaptado de Mendes, 2012.

Tabela 10 - Coeficientes da Equação cota versus S

Código UHE	A0	A1	A2
155	-289,4396	2,6232	-5,51E-03
156	167,2688	0,0464	7,64E-10
162	12,2522	0,0302	1,13E-04
169	433,5999	0,1306	-5,92E-07
172	86,8070	0,0818	-1,32E-06
176	213,0000	0,0000	0,00E+00
178	60,0000	0,0000	0,00E+00

Fonte: Adaptado de Mendes, 2012.

A Equação 17 foi usada para se calcular a quantidade de energia produzida por cada central hidrelétrica.

$$E_{Prod\ i,j} = g \cdot \eta \cdot Q_{Turb\ i,j} \cdot (h_{lago\ i,j} - h_{jus\ i,j}) \quad (17)$$

onde g é a constante gravitacional (m/s^2); η é o coeficiente de produtibilidade da Tabela 3; Q_{Turb} é a vazão turbinada (m^3/s) e $h_{lago\ i,j}$ e $h_{jus\ i,j}$ é o resultado das expressões que calculam a altura do nível do reservatório e do canal de jusante, respectivamente.

Diversos valores de variáveis podem retratar o estado que o sistema se apresenta em determinado intervalo de tempo, essas variáveis são assim chamadas de Variáveis de Estado. Destacam-se: Volume armazenado (m^3); Cota do Nível de Água do Reservatório (m); Cota do Canal de Jusante (m); Área da Superfície do Lago (km^2); Volume Evaporado (m^3); Vazão Turbinada (m^3/s) e Vazão Vertida (m^3/s).

Entretanto as variáveis $Q_{UC\ i,j}$, $Q_{jus\ i,j}$, $Q_{transp\ i,j}$ e $Q_{ref\ i,j}$ são limitadas por parâmetros, ou seja, o modelo deve distribuir as vazões de modo que as variáveis acima citadas se aproximem ao máximo de seus parâmetros. Quando estas variáveis estão na Função Objetivo – Equação 18, são denominadas Variáveis de Decisão. Pode-se citar como parâmetro: D_{UC} – Demanda de Uso Consuntivo (m^3/s); D_{TRANSP} – Demanda para Transposição (m^3/s); D_{NAT} – Demanda Natural (m^3/s); D_{EP} – Garantia Física da Usina (MW).

$$F.O.: \min z = \left(\left(\frac{D_{UC} - Q_{UC}}{D_{UC}} \right)^2 + \left(\frac{D_{EP} - E_{PROD}}{D_{EP}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{NAT} - Q_{JUS}}{Q_{NAT}} \right)^2 \right) \quad (18)$$

Sujeita às restrições:

- $S_{MIN} < S_t < S_{MAX}$
- $0 < Q_{TURB} < Q_{TURB.MAX}$
- $Q_{NAT} \geq Q_{JUS} \geq 0$
- $D_{UC} \geq Q_{UC}$
- $D_{TRANSP} \geq Q_{TRANSP}$
- $R_{MAX} \geq Q_{REF}$

As variáveis de interesse para avaliar o comportamento do modelo, ou seja, as Variáveis de Saída foram:

- Q_{UC} – Vazão para Uso Consuntivo (m^3/s);
- Q_{TRANSP} – Vazão para Transposição (m^3/s);
- Q_{REF} – Vazão para Reforço (m^3/s);
- E_{PROD} – Energia Produzida (MW);
- Q_{JUS} – Vazão de Jusante (m^3/s).

3.4.DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS

Foram definidos dois cenários para a bacia:

- Cenário 1 – Sistema sem Reforço de Vazão;
- Cenário 2 – Sistema com Reforço de Vazão.

Em cada cenário serão consideradas as afluências dos três principais períodos críticos: 1950 – 1955, 1998 – 2003 (MENDES, 2012) e 2011-2016 (ONS, 2015).

4. RESULTADOS

Para identificar a possível melhoria que o reforço de vazão pode trazer para a BHSF decidiu-se apresentar os dados na forma de tabelas, separadas por UHE e por variável de decisão, ou seja, tabelas para demanda de uso consuntivo, vazão ambiental e garantia física.

Como as UHE de Três Marias e Sobradinho regularizam o hidrograma de vazão para a maioria da calha principal, serão discutidos principalmente os resultados para estes empreendimentos.

4.1. PROCESSAMENTO

A otimização de cada cenário, realizada em um algoritmo desenvolvido em linguagem Julia, mostrado no Apêndice 1 foi feita por um computador pessoal com as seguintes configurações:

- Processador Intel® Core i7 3770 com 3,4 GHz;
- 8,0 GB de memória RAM.

O desempenho para cada cenário é apresentado pela Tabela 11.

Para cada variável de saída, foram calculados os índices de Confiabilidade, Resiliência e Vulnerabilidade, além de gerados gráficos de demanda *versus* vazão destinada, apresentados a seguir.

Tabela 11 - Desempenho do Julia em PNL

		Cenário 01	Cenário 02
1950 - 1955	T. de Processamento	7,703 s	7,218 s
	Nº de Interações	440	370
	Valor da F.O.	4431,06	4488,68
1998 - 2003	T. de Processamento	7,607 s	10,238 s
	Nº de Interações	397	538
	Valor da F.O.	2692,14	2797,41
2011 - 2016	T. de Processamento	6,759 s	6,895 s
	Nº de Interações	395	378
	Valor da F.O.	2189,23	2321,16

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

4.2. USO CONSUNTIVO

A Figura 20 retrata o desempenho do sistema para o atendimento da demanda de uso consuntivo da UHE de Três Marias. Já na Figura 21 está representado o mesmo requerimento para a UHE de Sobradinho, para o restante das UHE, o Apêndice 2, Apêndice 3, Apêndice 4, Apêndice 5 e Apêndice 6 os apresenta.

Para a UHE de Três Marias, no Cenário 1, sem reforço, em nenhum dos períodos críticos houve atendimento satisfatório da demanda. Já no Cenário 2 as demandas apresentam-se

atendidas de maneira satisfatória, ou seja, o reforço poderia resolver o problema do atendimento consuntivo.

Já na UHE de Sobradinho, mesmo no Cenário 2 não há atendimento total das demandas, mas verifica-se melhora no atendimento, ou seja, as vazões disponibilizadas pelo modelo são maiores.

Já os índices de desempenho para Três Marias, são apresentados pela Tabela 12 e pela Tabela 13 para Sobradinho. Para as outras UHE, são apresentados no Apêndice 7.

Tabela 12 - Índices de Desempenho para UC - Três Marias

	Período	Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
CENÁRIO 01	50-55	55.56%	18.75%	13.20%
	98-03	44.44%	17.50%	15.47%
	11-16	36.11%	15.22%	14.82%
CENÁRIO 02	50-55	91.67%	100.00%	0.13%
	98-03	88.89%	75.00%	0.03%
	11-16	84.72%	54.55%	1.34%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Tabela 13 - Índices de Desempenho para UC - Sobradinho

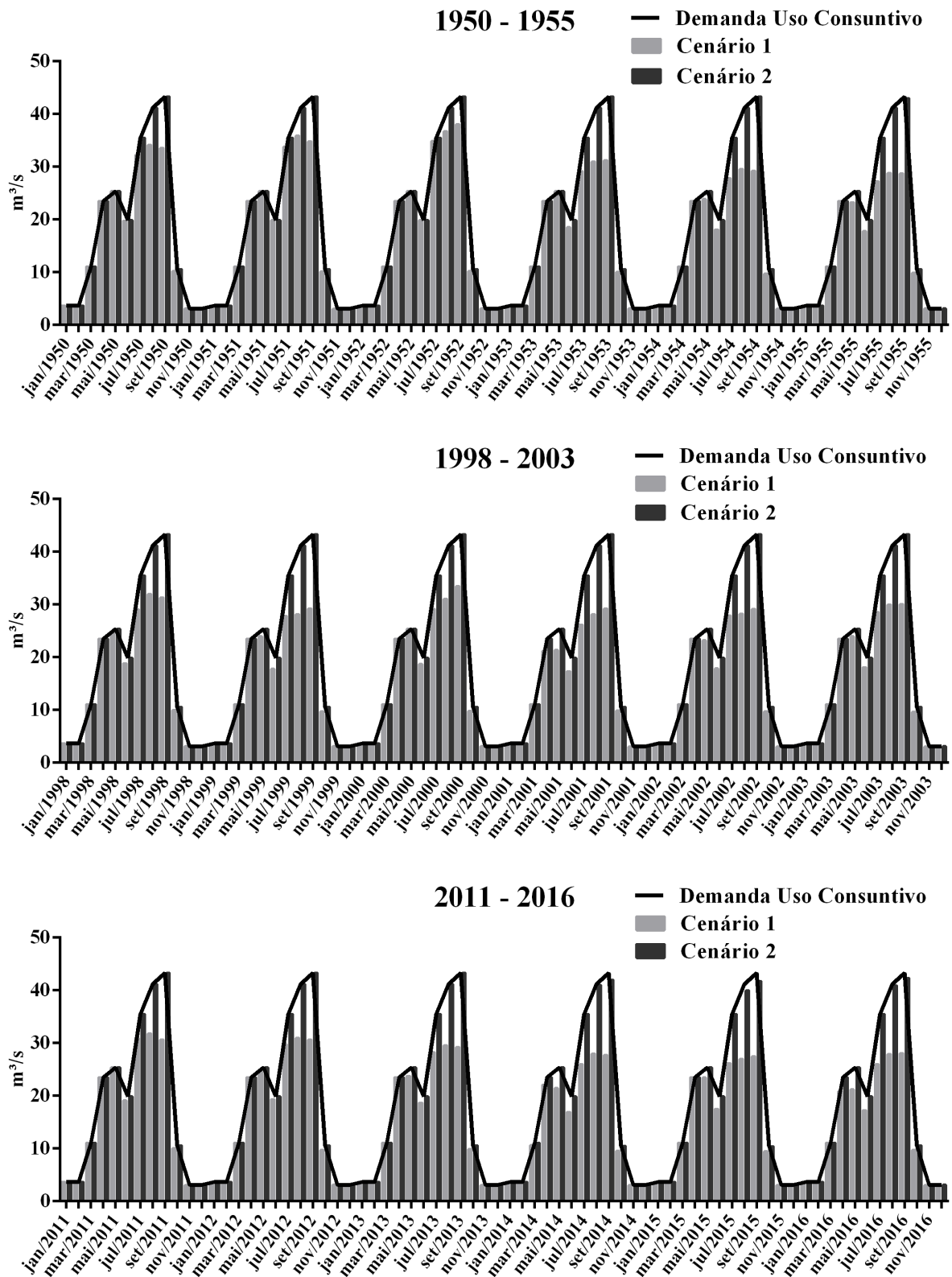
	Período	Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
CENÁRIO 01	50-55	51.39%	17.14%	27.35%
	98-03	41.67%	11.90%	39.13%
	11-16	30.56%	16.00%	37.06%
CENÁRIO 02	50-55	61.11%	21.43%	10.25%
	98-03	45.83%	15.38%	17.21%
	11-16	37.50%	17.78%	17.72%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Tanto para Sobradinho quanto Para Três Marias houve redução da Vulnerabilidade, ou seja, o déficit entre vazão solicitada e enviada diminuiu ao se reforçar o sistema. Os índices de Confiabilidade e Resiliência aumentaram nos cenários que consideravam o reforço, comprovando sua eficácia.

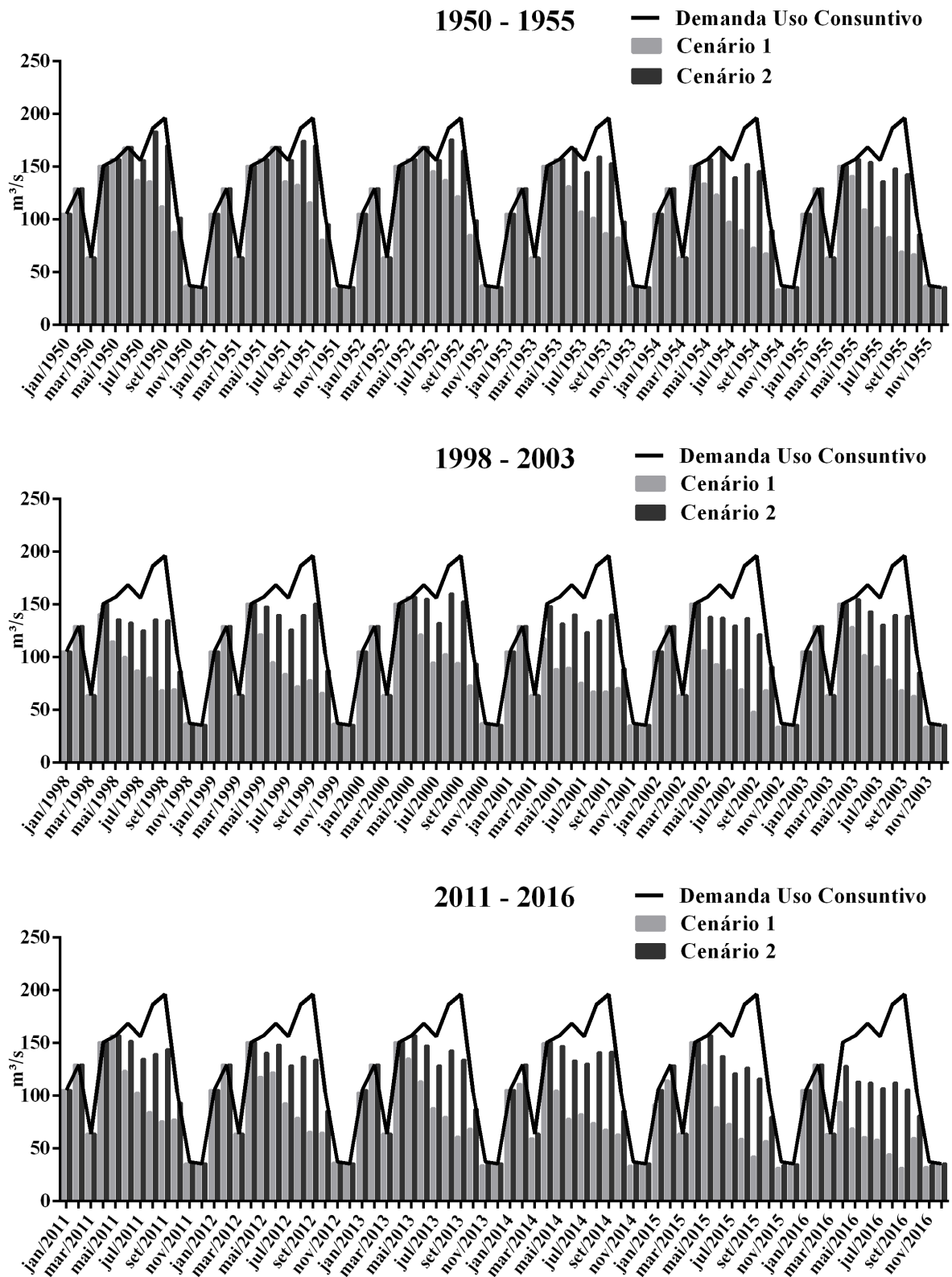
Observando-se a Figura 20 e Figura 21, nota-se que o sistema oferece os piores valores de atendimento para UC nos meses de inverno, já que, nesse período as vazões provenientes do Sudeste brasileiro são baixas. Portanto o regime do rio comporta-se de maneira semelhante ao padrão de afluência do Sudeste.

Figura 20 - Desempenho em Atendimento ao UC para Três Marias



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Figura 21- Desempenho em Atendimento ao UC para Sobradinho



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

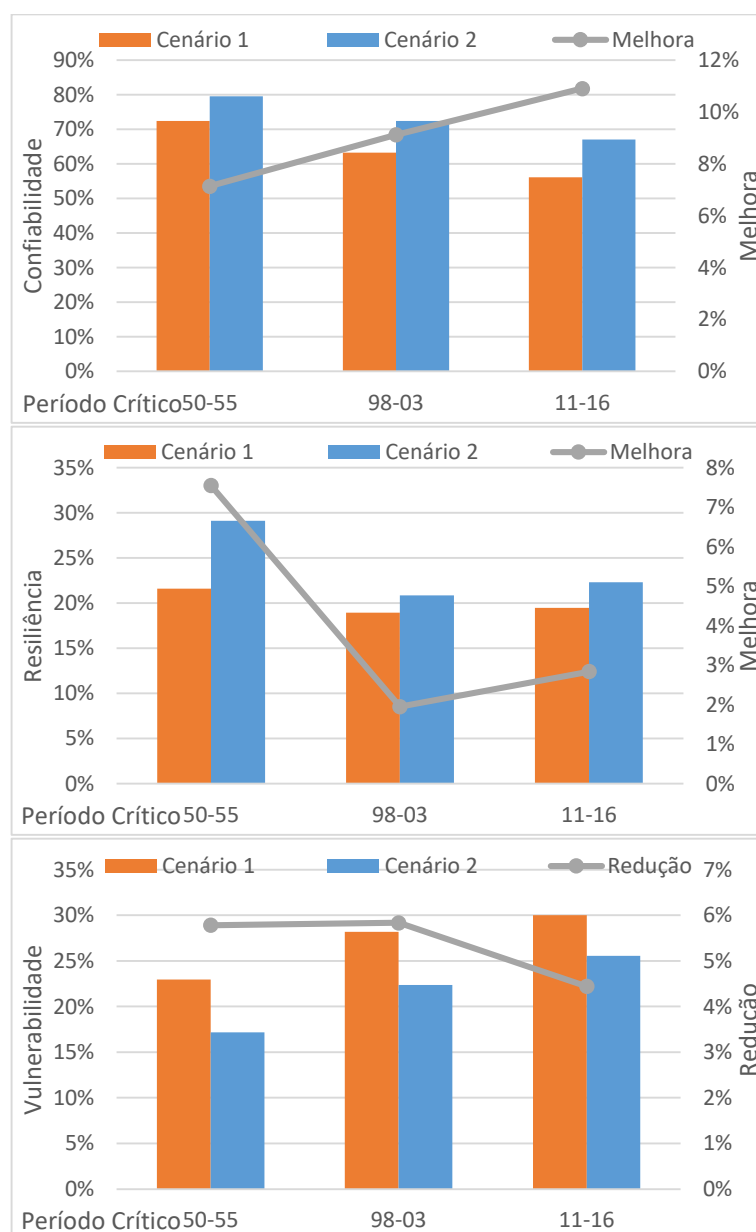
Os índices de desempenho para as usinas de Retiro Baixo, Queimado, Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso-Moxotó e Xingó, ou seja, do sistema completo são apresentados na Tabela 14 e na Figura 22.

Tabela 14 - Índices de Desempenho Global para UC

Período		50-55	98-03	11-16
Cenário 1	Confiabilidade	72.42%	63.29%	56.15%
	Resiliência	21.58%	18.92%	19.46%
	Vulnerabilidade	22.96%	28.19%	30.00%
Cenário 2	Confiabilidade	79.56%	72.42%	67.06%
	Resiliência	29.13%	20.86%	22.29%
	Vulnerabilidade	17.18%	22.36%	25.56%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Figura 22 - Desempenho Global do Sistema para Atendimento de UC



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

A Figura 22 e Tabela 14 mostram a melhora do funcionamento do sistema da BHSF. Observa-se que tanto houve redução do número de falhas quanto aumento da resiliência, ou seja, o sistema passa menos tempo em períodos críticos. Ainda é importante ressaltar que o reforço reduz o déficit de atendimento a Uso Consuntivo, tornando o sistema mais eficaz.

4.3. GARANTIA FÍSICA

A Figura 25 retrata o desempenho do sistema para o atendimento garantia física da UHE de Três Marias. Já na Figura 26 está representado o mesmo requerimento para a UHE de Sobradinho, para o restante das UHE, o Apêndice 8, Apêndice 9, Apêndice 10, Apêndice 11 e Apêndice 12 os apresenta.

Para a UHE de Três Marias, no Cenário 1, sem reforço, em nenhum dos períodos críticos houve atendimento satisfatório da demanda de produção de energia elétrica. Já no Cenário 2 a produção de energia continua não sendo atendida, mas há satisfatório crescimento, ou seja, o reforço aumentaria a produção de Energia Elétrica nos períodos críticos, com destaque para a melhora no período 2011 - 2016.

Já na UHE de Sobradinho, mesmo no Cenário 2 não há produção suficiente para atender a demanda, mas verifica-se melhora no atendimento, ou seja, as vazões disponibilizadas pelo modelo para geração de energia são maiores. Verifica-se ainda que o pior déficit ocorre na crise de 2011-2016.

Já os índices de desempenho para Três Marias, são apresentados pela Figura 23 e pela Figura 24 para Sobradinho. Para as outras UHE, são apresentados no Apêndice 13.

Figura 23- Índices de Desempenho para Garantia Física - Três Marias

	Período	Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
CENÁRIO 01	50-55	25.00%	14.81%	39.39%
	98-03	20.83%	14.04%	46.64%
	11-16	11.11%	7.81%	49.21%
CENÁRIO 02	50-55	25.00%	14.81%	16.05%
	98-03	20.83%	14.04%	11.85%
	11-16	11.11%	7.81%	12.31%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

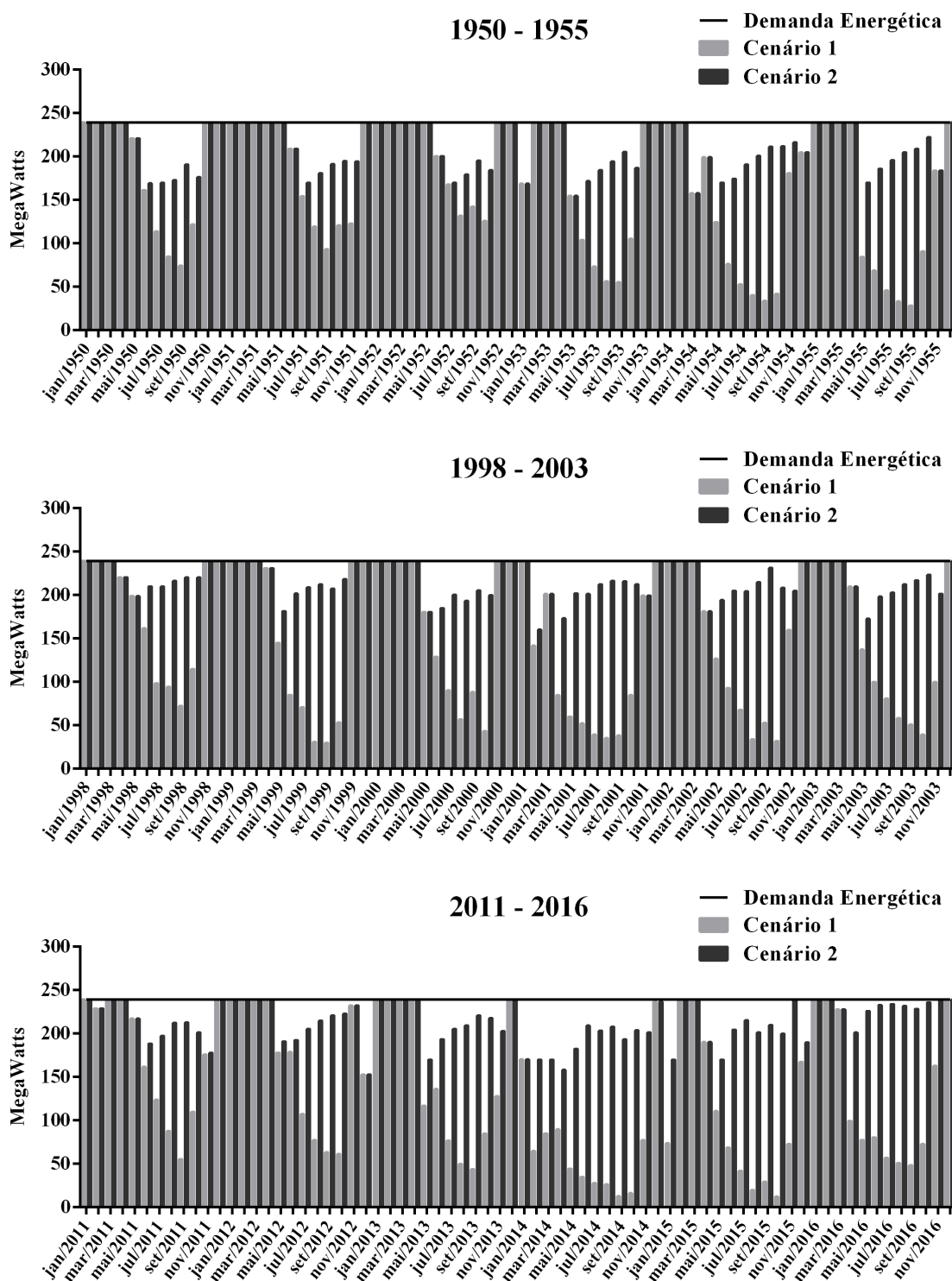
Figura 24 - Índices de Desempenho para Garantia Física – Sobradinho

	Período	Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
CENÁRIO 01	50-55	33.33%	14.58%	36.91%
	98-03	22.22%	12.50%	47.52%
	11-16	15.28%	6.56%	51.10%
CENÁRIO 02	50-55	33.33%	14.58%	23.12%
	98-03	22.22%	12.50%	30.29%
	11-16	15.28%	6.56%	32.53%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

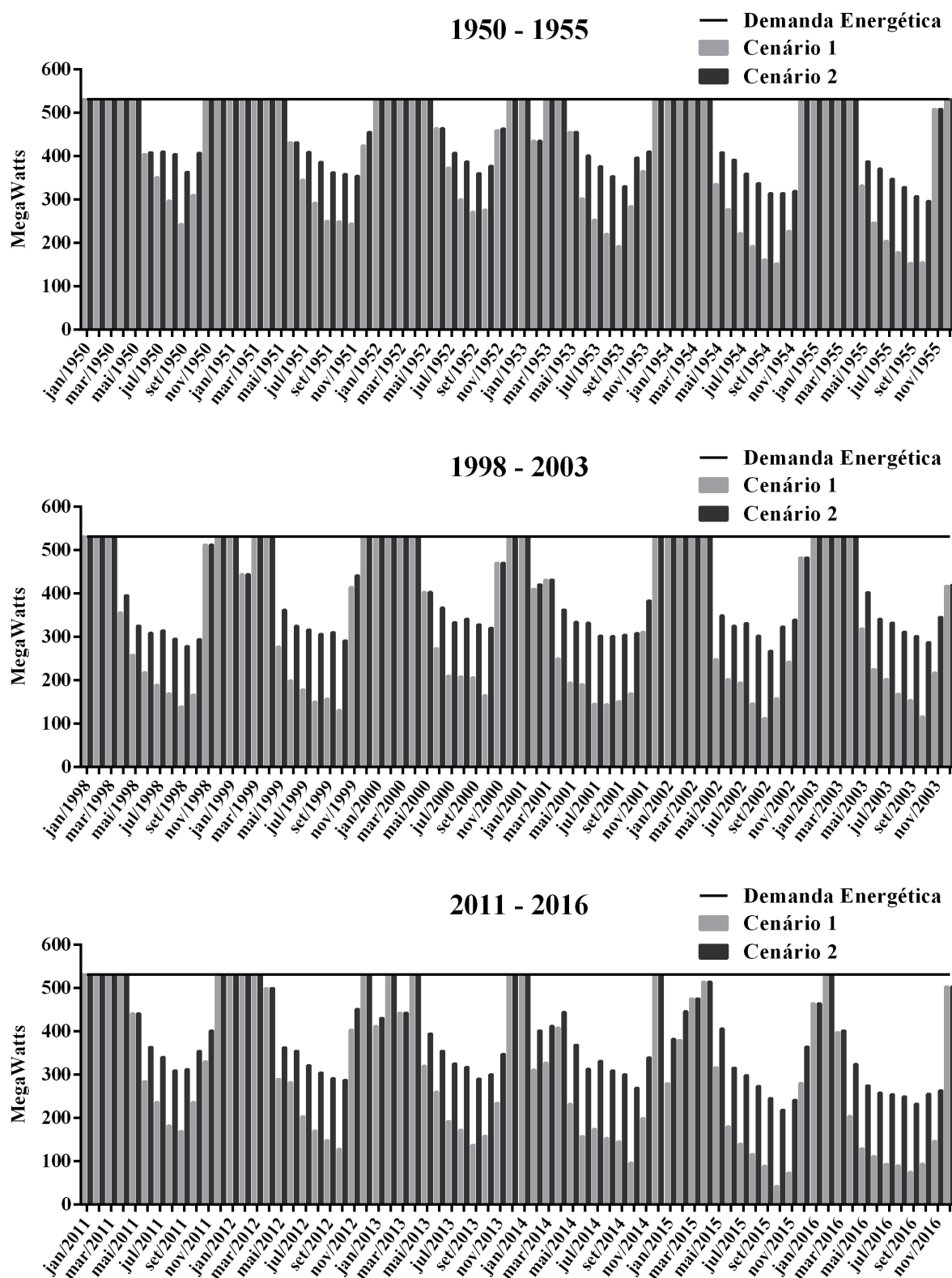
Analisando-se os índices para Três Marias verifica-se que a confiabilidade e a resiliência não se alteraram, ou seja, houve o mesmo número de falhas e elas percorreram a mesma quantidade de meses. Já a vulnerabilidade, como o sistema passou a produzir mais energia, foi reduzida. O mesmo ocorreu para Sobradinho.

Figura 25- Desempenho em Atendimento à Garantia Física para Três Marias



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Figura 26 - Desempenho em Atendimento à Garantia Física para Sobradinho



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Os índices de desempenho para o sistema completo são apresentados na Tabela 15 na Figura 27. Observa-se que os valores de Confiabilidade e Vulnerabilidade permaneceram iguais

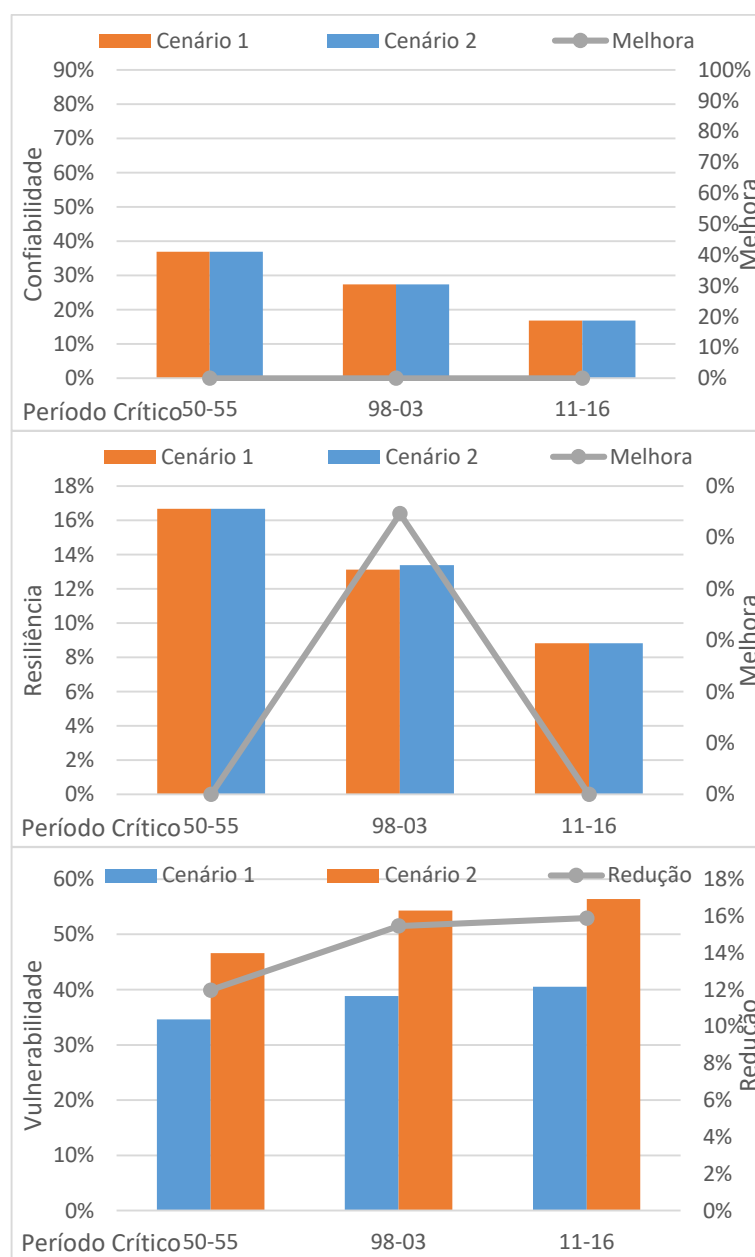
e que houve redução da parcela de Vulnerabilidade, já que as usinas passaram a produzir mais Eletricidade.

Tabela 15- Índice de Desempenho Global para Garantia Física

	Período	50-55	98-03	11-16
Cenário 1	Confiabilidade	36.90%	27.38%	16.87%
	Resiliência	16.67%	13.11%	8.83%
	Vulnerabilidade	46.61%	54.29%	56.42%
Cenário 2	Confiabilidade	36.90%	27.38%	16.87%
	Resiliência	16.67%	13.39%	8.83%
	Vulnerabilidade	34.64%	38.84%	40.54%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Figura 27 - Desempenho Global do Sistema para Garantia Física



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

4.4. VAZÃO AMBIENTAL

As respostas do sistema para o atendimento aos limites mínimos de vazão a jusante para a UHE de Três Marias são mostradas pela Figura 30, para a UHE de Sobradinho pela Figura 31 e para as demais UHE no Apêndice 14, Apêndice 15, Apêndice 16, Apêndice 17 e Apêndice 18.

Tanto para Sobradinho quanto para Três Marias, o modelo sem reforço oferece risco para a natureza à jusante dessas UHE já que as mesmas liberam uma vazão muito menor que a recomendada pelo órgão regulador. Já no cenário com o reforço, as vazões conseguem atender à solicitação mínima para a usina Três Marias e se aproximam do mínimo na UHE de Sobradinho.

Os índices de desempenho para o sistema são dados pela Figura 28 para Três Marias e pela Figura 29 para Sobradinho. Para o restante das UHE, os dados estão disponíveis no Apêndice 19.

Figura 28- Índices de Desempenho para Vazão Ambiental - Três Marias

	Período	Confiabilidade	Resiliência
CENÁRIO 01	50-55	61.11%	21.43%
	98-03	51.39%	20.00%
	11-16	44.44%	17.50%
CENÁRIO 02	50-55	100.00%	-
	98-03	100.00%	-
	11-16	100.00%	-

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

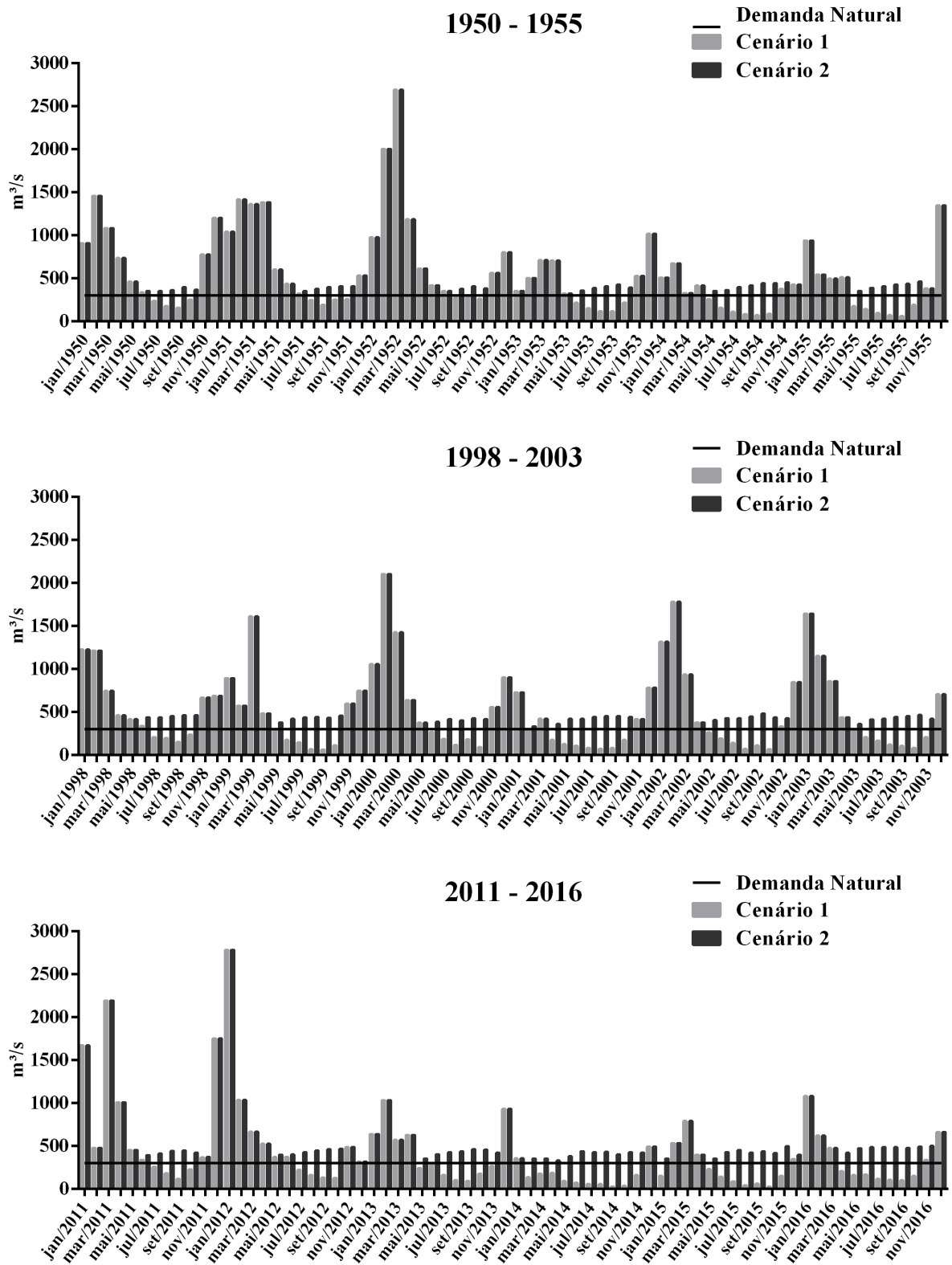
Figura 29- Índices de Desempenho para Vazão Ambiental - Sobradinho

	Período	Confiabilidade	Resiliência
CENÁRIO 01	50-55	59.72%	20.69%
	98-03	45.83%	15.38%
	11-16	37.50%	17.78%
CENÁRIO 02	50-55	77.78%	37.50%
	98-03	52.78%	17.65%
	11-16	55.56%	18.75%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

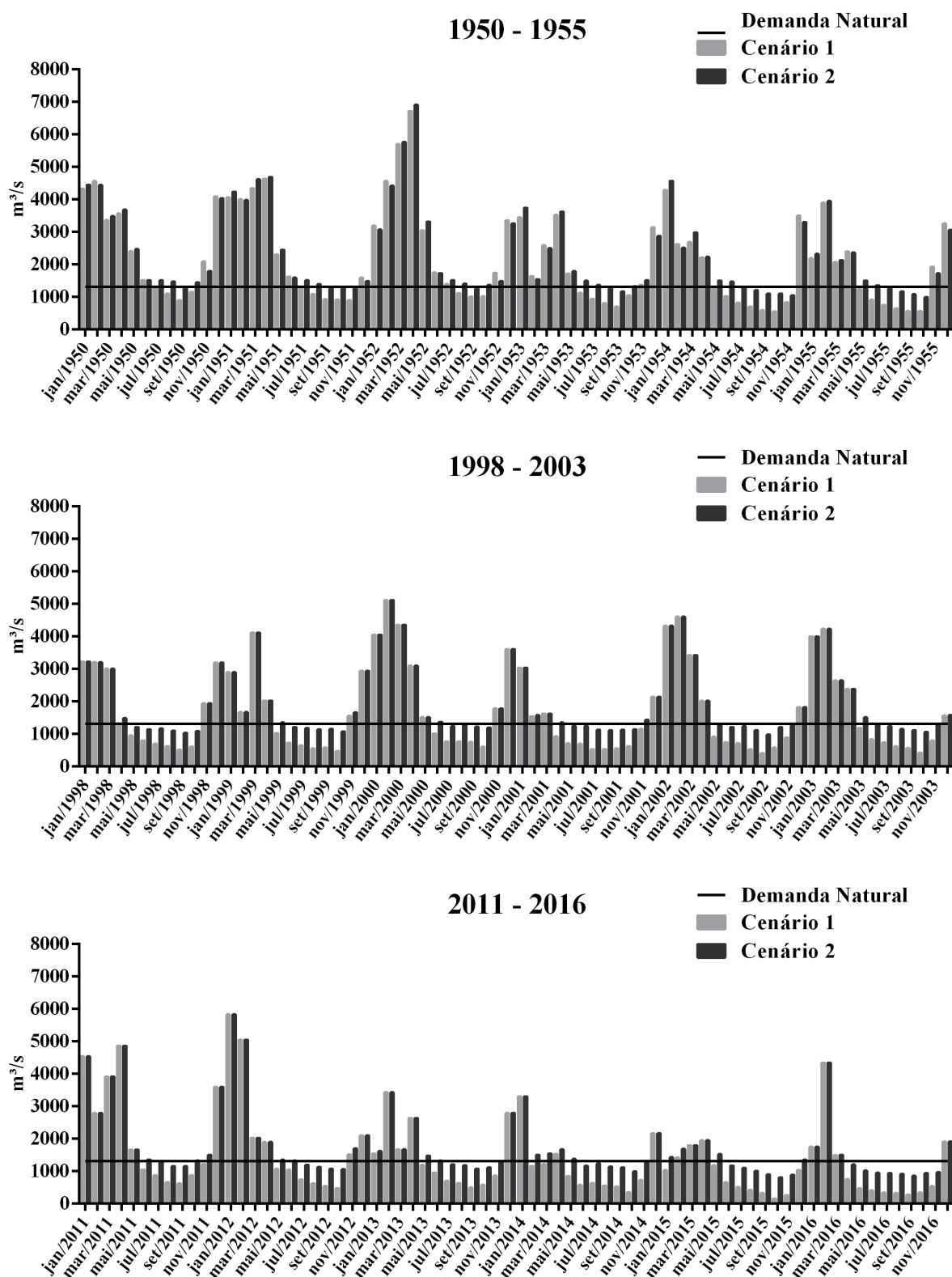
Afirmando o acima exposto, o reforço de vazão conseguiu atender a requisição do órgão ambiental para a UHE de Três Marias, para Sobradinho não houve atendimento em todos os intervalos mensais mas houve significativa melhora.

Figura 30 - Desempenho em Atendimento à Vazão Ambiental para Três Marias



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Figura 31 - Desempenho em Atendimento à Vazão Ambiental para Sobradinho



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Os índices globais estão apresentados na Tabela 16 e Figura 32.

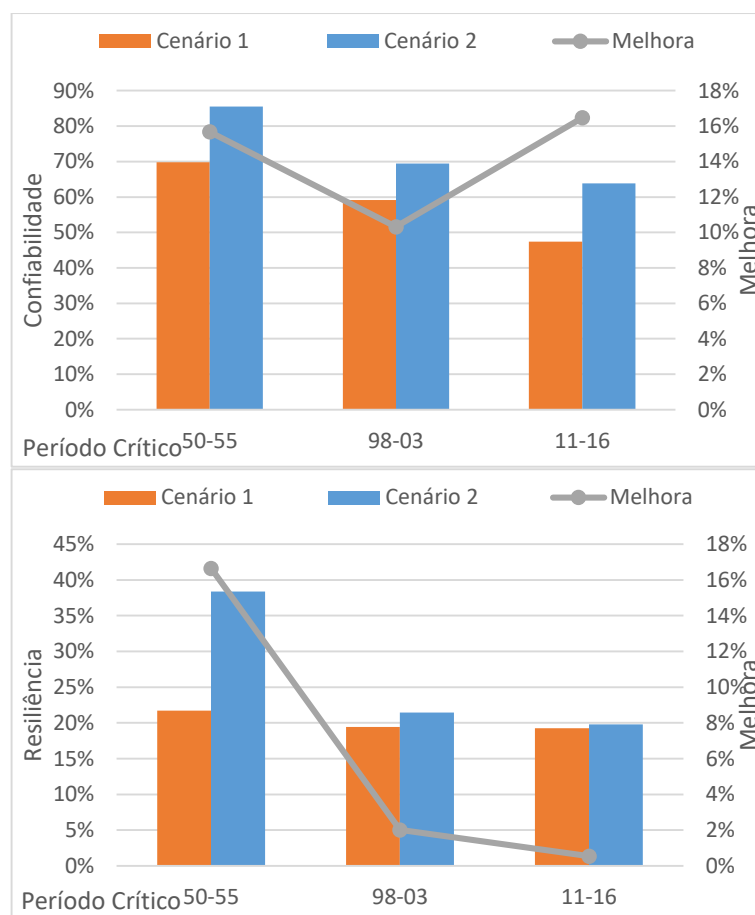
Tabela 16 - Índices Globais para Vazão Ambiental

	Período	50-55	98-03	11-16
Cenário 1	Confiabilidade	69.84%	59.13%	47.42%
	Resiliência	21.71%	19.42%	19.25%
	Vulnerabilidade	0.00%	0.00%	0.00%
Cenário 2	Confiabilidade	85.52%	69.44%	63.89%
	Resiliência	38.36%	21.43%	19.78%
	Vulnerabilidade	0.00%	0.00%	0.00%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Os índices de vulnerabilidade não foram calculados, já que, como tanto o déficit quanto o superávit são penalizados pela equação, não fazia sentido, já que vazões maiores que as vazões naturais mínimas seriam benéficas para a natureza e mesmo assim continuariam sendo penalizadas pelo índice.

Figura 32 - Índices Globais para Vazão Ambiental



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Percebe-se assim, de acordo com a Figura 32 que realmente houve melhora no desempenho do sistema quando o quesito foi atendimento à vazão natural mínima.

4.5. PONTOS IMPORTANTES:

- Em todos os períodos críticos analisados a solução ótima do modelo com reforço de vazão, que melhor atende as demandas, não atendeu ao mínimo de 1300 m³/s que deveriam ser liberados da UHE de Sobradinho, liberando o mínimo de apenas 113.5 m³/s, explicando a escassez hídrica no SFB, já que as demais UHE a partir de Sobradinho são a fio d'água;
- As demandas de UC foram consideradas concomitantemente. Então deve-se levar em conta que na prática nem todas as captações funcionam ao mesmo tempo nem integralmente. Entretanto, os resultados mostram a dificuldade de atendimento às demandas em anos de seca;
- O reforço considerado neste trabalho tinha valor fixo, não respeitando a variação sazonal de disponibilidade hídrica. Recomenda-se então que, em estudos futuros, se considere a variação mensal das vazões por meio de estudos de disponibilidade nas bacias hidrográficas fornecedoras do mesmo.
- Quanto à geração de energia elétrica, uma vez que o SIN interligou os sistemas elétricos de todas as regiões brasileiras, os déficits podem ser compensados. Tal fato pode gerar uma crise elétrica generalizada nos períodos em que outras regiões também passem por períodos de seca concomitantemente, levando ao acionamento de ainda mais usinas termelétricas e outros modos de geração de energia elétrica.

5. CONCLUSÃO

A implantação do código em Julia foi rápida e simplificada já que existe bastante interatividade da plataforma com o usuário. Os desempenhos quanto à velocidade e convergência foram satisfatórios, já que a resolução não chegou a mil interações nem ultrapassou 30 segundos.

As considerações das obras de reforço da BHSF foram feitas na elaboração dos cenários, que, como esperado e mostrado no item de resultados, obtiveram-se resultados satisfatórios, já que o reforço melhorou o atendimento aos usos consuntivos, o atendimento à garantia física e à vazão mínima a jusante.

Entretendo é importante ressaltar que, mesmo com o reforço o atendimento integral aos usos não foi obtido. O atendimento ainda se mostrou deficiente nos meses de inverno, devido ao regime hídrico do rio, que obedece, principalmente, ao padrão do Sudeste. Portanto ações maiores são necessárias na bacia, com mais intervenções e uso de outras estratégias como controle dos consumidores, fiscalização de uso irregular e, principalmente projetos de revitalização do rio.

O modelo funcionou bem para a cascata de reservatórios, considerando-se o atendimento à geração de energia elétrica, o atendimento aos usos consuntivos e não consuntivos implantado. Alguns implantados no modelo como restrições e outros como variáveis de decisão.

Como dito, o comportamento do sistema ao reforço de vazão foi satisfatório já que a disponibilidade das variáveis de decisão da função objetivo aumentou, resultando na melhora dos índices de desempenho, tanto das usinas analisadas, Três Marias e Sobradinho, quanto do sistema global.

REFERÊNCIAS

ANA, Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2013**. Brasília, 2013.

_____. **Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2004-2013): síntese executiva com apreciação das deliberações do CBHSF aprovadas na III Reunião Plenária de 28 a 31 de julho de 2004**. Agência Nacional de Águas, Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Brasília: ANA, 2005a.

_____. **Outorga ao Ministério da Integração Nacional o direito de uso de recursos hídricos do Rio São Francisco, para execução do Projeto de Integração do Rio São Francisco as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional**. Brasília, 2005b.

_____. Portal Hidroweb, metadados. Disponível em <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>>. Acesso em 04 de novembro de 2017.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **BIG – Banco de Informações de Geração**. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acessado em 02 de novembro de 2017.

_____. **Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (SIGEL)**. Brasília: ANEEL, 2015.

ALMEIDA, C. N. **Modelagem Integrada de Recursos Hídricos com Apoio de um Sistema de Informações Geográficas**. 115 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Rio São Francisco: patrimônio cultural e natural**. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais, 2003.

BEZANSON, J. et al. **O Manual de Julia: Introdução**. Disponível em:< http://julia-pt-br.readthedocs.io/pt_BR/latest/manual/introduction.html>. Acesso em 01 de novembro de 17.

BRASIL. Lei Federal nº. 9.433, de 8 de janeiro de 1977. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da CF, altera o artigo 1º. Da Lei 8.001 de 13.03.1990 que modificou a Lei 7.990, de 28.12.1989. Disponível em:< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em 02 de novembro de 2017.

BRAVO, J. M. **Subsídios à Operação de Reservatórios Baseada na Previsão de Variáveis Hidrológicas**. 226 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PILAR, J. V. Otimização de Regras de Operação de Reservatórios com Incorporação de Previsão de Vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, ABRH, v. 13. n. 1, jan/mar. 2008.

CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível em <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/inicio>. Acesso em 04 de novembro de 2017.

CELESTE, A. B.; SUZUKI, K.; KADOTA, A. Algoritmos Genéticos para Operação Ótima de Sistemas de Recursos Hídricos em Tempo Real. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, ABRH, v. 8. n. 3, jul/set. 2003.

CGEE; ANA. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; Agência Nacional de Águas. **A Questão da Água no Nordeste**. Brasília: CGEE, 2012.

CEPED, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres; UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012**. 2ª ed. Florianópolis: CEPED/UFSC, 2013.

CODEVASF, Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. Disponível em < <http://www.codevasf.gov.br/> >. Acesso em 03 de novembro de 2017.

CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Otimização das Obras de Controle de Cheias em uma Bacia Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, ABRH, v. 12. n. 2, abr/jun. 2007.

CURI, W. F.; CELESTE, A. B.; ALBUQUERQUE, A. A. de. Modelo de Otimização Combinado para a Operação de Sistemas de Distribuição de Água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, ABRH, v. 17. n. 2, abr/jun. 2012.

ENGIE, Glossário. Disponível em <<http://www.engieenergia.com.br/wps/portal/internet/glossario/e>>. Acesso em 04 de novembro de 2017.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation. **Water Resources Research**. v. 18. n. 1, fev. 1982.

KELMAN, J. et al. Hidreletricidade. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Orgs.). **Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3ª ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006.

LIMA, H. V. C.; LANNA, A. E. L. Modelos para Operação de Sistemas de Reservatórios: Atualização do Estado da Arte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, ABRH, v. 10. n. 3, jul/set. 2005.

LIMA, P. M. **Fábrica de Pedra**. 2 ed. Brasília: Edições do Senado Federal, 2013.

LOUCKS, D. P.; BEEK, E. V. **Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications**. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2006.

MACHADO, R. C. V. **Rio São Francisco**. Disponível em: <http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar/index.php?option=com_content&id=225>. Acesso em: 17 de setembro de 2017.

MENDES, L. A. **O Impacto dos Usos Consuntivos na Operação de Sistemas de Reservatórios para Produção de Energia Elétrica**. 168 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MELO, F. A. M. **Simulação-Otimização de Regras Operacionais de Reservatórios: Estudo de Caso em Sergipe**. 41 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2015.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. **Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco**. Brasília: MMA, 2006. 148 p.

MMA/ANA/CBHSF/AGB Peixe Vivo/GAT/NEMUS. **Resumo Executivo do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016 – 2025: RF3 – Resumo Executivo**. Maceió: CBHSF, 2016.

MOLION, L. C. B. Águas do Tocantins para o São Francisco. **Ciência Hoje**. v.33, n. 197, p. 58-61, fev. 2003.

NASA, National Aeronautics and Space Administration. **Basic Comparison of Python, Julia, R, Matlab and IDL**. Disponível em: <<https://modelingguru.nasa.gov/docs/DOC-2625>>. Acesso em 04 de novembro de 2017.

NEMUS, Gestão e Requalificação Ambiental. **Relatório de Diagnóstico da Dimensão Técnica e Institucional do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. Salvador, 2015.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Carta ONS 0527/100/2015 – Redução das Vazões Mínimas no Médio e Baixo São Francisco – março de 2015**. Rio de Janeiro, 2015.

PORTO, R. L. L. et al. (Org.). **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2002.

RAO, S. S. **Engineering Optimization: theory and practice**. 4ª ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

RIGUETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. 1ª ed. São Carlos: EESC/USP, 1998.

SANTANA, R. F. **Operação de Reservatório via Otimização Estocástica Implícita: Estudo de Caso em Sergipe**. 36 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2015.

SANTOS, W. M. **Operação de Reservatório via Programação Dinâmica Estocástica: Estudo de Caso em Sergipe**. 45 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2015.

SILVA, F. B. **Análise dos Impactos da Não-Estacionariedade da Série de Vazão Afluente no Desempenho do Reservatório de Sobradinho e na Transposição do Rio São Francisco**. 92 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da Editora da UFRGS, 2005.

YEH, W. W-G. Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 21. n. 12, dez. 1985.

APÊNDICES

Apêndice 1 - Algoritmo em Julia

#CARREGAR VAZÃO NATURAL (m³/s)

```
vaz_nat_155 = readlm("155.csv", ',', Float64, header=false, '\n')[1, 2:end]
vaz_nat_156 = readlm("156.csv", ',', Float64, header=false, '\n')[1, 2:end]
vaz_nat_162 = readlm("162.csv", ',', Float64, header=false, '\n')[1, 2:end]
vaz_nat_169 = readlm("169.csv", ',', Float64, header=false, '\n')[1, 2:end]
vaz_nat_172 = readlm("172.csv", ',', Float64, header=false, '\n')[1, 2:end]
vaz_nat_176 = readlm("176.csv", ',', Float64, header=false, '\n')[1, 2:end]
vaz_nat_178 = readlm("178.csv", ',', Float64, header=false, '\n')[1, 2:end]
```

#CARREGAR EVAPORAÇÃO MENSAL (mm/mês)

```
evap_155 = readlm("evap_155.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
evap_156 = readlm("evap_156.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
evap_162 = readlm("evap_162.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
evap_169 = readlm("evap_169.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
evap_172 = readlm("evap_172.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
evap_176 = readlm("evap_176.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
evap_178 = readlm("evap_178.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
```

#CARREGAR MATRIZ DE TEMPO (s)

```
tempo1 = readlm("tempo_t.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
```

#CARREGAR MATRIZ DE ARMAZENAMENTO MÁXIMO (m³)

```
arm_max_155 = readlm("vol_max_arm_155.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
arm_max_156 = readlm("vol_max_arm_156.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
arm_max_162 = readlm("vol_max_arm_162.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
arm_max_169 = readlm("vol_max_arm_169.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
arm_max_172 = readlm("vol_max_arm_172.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
arm_max_176 = readlm("vol_max_arm_176.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
arm_max_178 = readlm("vol_max_arm_178.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
```

#CARREGAR A MATRIZ DE TURBINAMENTO MÁXIMO (m³/s)

```
vaz_turb_max_155 = readlm("vaz_max_turb_155.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
vaz_turb_max_156 = readlm("vaz_max_turb_156.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
vaz_turb_max_162 = readlm("vaz_max_turb_162.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
vaz_turb_max_169 = readlm("vaz_max_turb_169.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
vaz_turb_max_172 = readlm("vaz_max_turb_172.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
vaz_turb_max_176 = readlm("vaz_max_turb_176.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
vaz_turb_max_178 = readlm("vaz_max_turb_178.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
```

#CARREGAR A MATRIZ DE DEMANDAS PARA USO CONSUNTIVO (m³/s)

```
dem_uc_155 = readlm("dem_uc_155.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
dem_uc_156 = readlm("dem_uc_156.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
dem_uc_162 = readlm("dem_uc_162.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
dem_uc_169 = readlm("dem_uc_169.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
dem_uc_172 = readlm("dem_uc_172.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
dem_uc_176 = readlm("dem_uc_176.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
dem_uc_178 = readlm("dem_uc_178.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
```

#CARREGAR A MATRIZ DE DEMANDAS PARA TRANSPOSIÇÃO (m³/s)

```
dem_transp_155 = readlm("dem_transp_155.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
dem_transp_156 = readlm("dem_transp_156.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
dem_transp_162 = readlm("dem_transp_162.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
dem_transp_169 = readlm("dem_transp_169.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
dem_transp_172 = readlm("dem_transp_172.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
dem_transp_176 = readlm("dem_transp_176.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
dem_transp_178 = readlm("dem_transp_178.csv", ',', Float64, header=false, '\n')
```

```
#CARREGAR MATRIZ DE REFORÇO MÁXIMO (m³/s)
ref_max_155 = readlm("ref_max_155.csv", ';', Float64, header=false, '\n')
ref_max_156 = readlm("ref_max_156.csv", ';', Float64, header=false, '\n')
ref_max_162 = readlm("ref_max_162.csv", ';', Float64, header=false, '\n')
ref_max_169 = readlm("ref_max_169.csv", ';', Float64, header=false, '\n')
ref_max_172 = readlm("ref_max_172.csv", ';', Float64, header=false, '\n')
ref_max_176 = readlm("ref_max_176.csv", ';', Float64, header=false, '\n')
ref_max_178 = readlm("ref_max_178.csv", ';', Float64, header=false, '\n')
```

```
#DEFINIÇÃO DO TAMANHO DAS MATRIZES
```

```
m=size(vaz_nat_155,1)
n=size(vaz_nat_155,2)
```

```
#CARREGAR O ARMAZENAMENTO INICIAL (hm³)
```

```
vol_arm_ini_155 = zeros(Float64, m, n)
vol_arm_ini_156 = zeros(Float64, m, n)
vol_arm_ini_162 = zeros(Float64, m, n)
vol_arm_ini_169 = zeros(Float64, m, n)
vol_arm_ini_172 = zeros(Float64, m, n)
vol_arm_ini_176 = zeros(Float64, m, n)
vol_arm_ini_178 = zeros(Float64, m, n)
vol_arm_ini_155[1,1] = arm_max_155[1,1]
vol_arm_ini_156[1,1] = arm_max_155[1,1]
vol_arm_ini_162[1,1] = arm_max_162[1,1]
vol_arm_ini_169[1,1] = arm_max_169[1,1]
vol_arm_ini_172[1,1] = arm_max_172[1,1]
vol_arm_ini_176[1,1] = arm_max_176[1,1]
vol_arm_ini_178[1,1] = arm_max_178[1,1]
```

```
#CARREGANDO OS PACOTES DE OTIMIZAÇÃO
```

```
using JuMP
using Ipopt
```

```
#NOMEAR O MODELO E DEFINIR O SOLVER
```

```
bhsf = Model(solver=IpoptSolver())
```

```
#DEFINIR AS VARIÁVEIS DE USO CONSUNTIVO (m³)
```

```
@variable(bhsf, uc_155[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, uc_156[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, uc_162[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, uc_169[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, uc_172[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, uc_176[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, uc_178[1:m, 1:n] >= 0.00)
```

```
#DEFINIR AS VARIÁVEIS DE TRANSPOSIÇÃO (m³)
```

```
@variable(bhsf, transp_155[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, transp_156[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, transp_162[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, transp_169[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, transp_172[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, transp_176[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, transp_178[1:m, 1:n] >= 0.00)
```

```
#DEFINIR AS VARIÁVEIS DE REFORÇO (m³)
```

```
@variable(bhsf, ref_155[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, ref_156[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, ref_162[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, ref_169[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, ref_172[1:m, 1:n] >= 0.00)
```



```
@variable(bhsf, ref_176[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, ref_178[1:m, 1:n] >= 0.00)
```

```
#DEFINIR A VARIÁVEL DE NÍVEL DE AGUA E SEUS LIMITES (m)
```

```
@variable(bhsf, 614.00 <= h_155[1:m, 1:n] <= 616.00)
@variable(bhsf, 549.20 <= h_156[1:m, 1:n] <= 572.50)
@variable(bhsf, 811.00 <= h_162[1:m, 1:n] <= 829.00)
@variable(bhsf, 380.50 <= h_169[1:m, 1:n] <= 392.50)
@variable(bhsf, 299.00 <= h_172[1:m, 1:n] <= 304.00)
```

```
#DEFINIR A VARIÁVEL DE ÁREA (km²)
```

```
@variable(bhsf, 15.15263430553 <= area_155[1:m, 1:n] <= 22.78345598)
@variable(bhsf, 364.490751247853 <= area_156[1:m, 1:n] <= 1073.696715872730)
@variable(bhsf, 16.153134240769 <= area_162[1:m, 1:n] <= 64.019472319633)
@variable(bhsf, 1127.596137980410 <= area_169[1:m, 1:n] <= 4200.830665213530)
@variable(bhsf, 609.653255349927 <= area_172[1:m, 1:n] <= 815.706344621809)
```

```
#DEFINIR A VARIÁVEL DE ALTURA DE JUSANTE (m)
```

```
@variable(bhsf, h_jus_155[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, h_jus_156[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, h_jus_162[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, h_jus_169[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, h_jus_172[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, h_jus_176[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, h_jus_178[1:m, 1:n] >= 0.00)
```

```
#DEFINIR A VARIÁVEL DE ENERGIA PRODUZIDA (MW)
```

```
@variable(bhsf, ene_prod_155[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, ene_prod_156[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, ene_prod_162[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, ene_prod_169[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, ene_prod_172[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, ene_prod_176[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, ene_prod_178[1:m, 1:n] >= 0.00)
```

```
#DEFINIR A VARIÁVEL DE VOLUME EVAPORADO (m³)
```

```
@variable(bhsf, vol_evap_155[1:m, 1:n])
@variable(bhsf, vol_evap_156[1:m, 1:n])
@variable(bhsf, vol_evap_162[1:m, 1:n])
@variable(bhsf, vol_evap_169[1:m, 1:n])
@variable(bhsf, vol_evap_172[1:m, 1:n])
@variable(bhsf, vol_evap_176[1:m, 1:n])
@variable(bhsf, vol_evap_178[1:m, 1:n])
```

```
#DEFINIR A VARIÁVEL DE VAZÃO TURBINADA (m³/s)
```

```
@variable(bhsf, vaz_turb_155[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_turb_156[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_turb_162[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_turb_169[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_turb_172[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_turb_176[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_turb_178[1:m, 1:n] >= 0.00)
```

```
#DEFINIR A VARIÁVEL DE VAZÃO VERTIDA (m³/s)
```

```
@variable(bhsf, vaz_vert_155[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_vert_156[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_vert_162[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_vert_169[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_vert_172[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_vert_176[1:m, 1:n] >= 0.00)
```

```
@variable(bhsf, vaz_vert_178[1:m, 1:n] >= 0.00)
```

```
#DEFINIR A VARIÁVEL DE VAZÃO DE JUSANTE (m³/s)
```

```
@variable(bhsf, vaz_jus_155[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_jus_156[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_jus_162[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_jus_169[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_jus_172[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_jus_176[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, vaz_jus_178[1:m, 1:n] >= 0.00)
```

```
#DEFINIR A VARIÁVEL DO DEFICIT HÍDRICO E DE ENERGIA (s.d.)
```

```
@variable(bhsf, z_155[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, z_156[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, z_162[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, z_169[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, z_172[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, z_176[1:m, 1:n] >= 0.00)
@variable(bhsf, z_178[1:m, 1:n] >= 0.00)
```

```
#DEFINIR OS LIMITES MÍNIMO E MÁXIMO DE ARMAZENAMENTO (hm³)
```

```
@variable(bhsf, 200.72 <= vol_arm_fin_155[1:m, 1:n] <= 241.59)
@variable(bhsf, 4250.00 <= vol_arm_fin_156[1:m, 1:n] <= 19528.00)
@variable(bhsf, 95.25 <= vol_arm_fin_162[1:m, 1:n] <= 557.00)
@variable(bhsf, 5447.00 <= vol_arm_fin_169[1:m, 1:n] <= 34116.00)
@variable(bhsf, 7234.00 <= vol_arm_fin_172[1:m, 1:n] <= 10782.00)
@variable(bhsf, 1226.00 <= vol_arm_fin_176[1:m, 1:n] <= 1226.00)
@variable(bhsf, 3800.00 <= vol_arm_fin_178[1:m, 1:n] <= 3800.00)
@variable(bhsf, 200.72 <= vol_arm_ini_155[1:m, 1:n] <= 241.59)
@variable(bhsf, 4250.00 <= vol_arm_ini_156[1:m, 1:n] <= 19528.00)
@variable(bhsf, 95.25 <= vol_arm_ini_162[1:m, 1:n] <= 557.00)
@variable(bhsf, 5447.00 <= vol_arm_ini_169[1:m, 1:n] <= 34116.00)
@variable(bhsf, 7234.00 <= vol_arm_ini_172[1:m, 1:n] <= 10782.00)
@variable(bhsf, 1226.00 <= vol_arm_ini_176[1:m, 1:n] <= 1226.00)
@variable(bhsf, 3800.00 <= vol_arm_ini_178[1:m, 1:n] <= 3800.00)
```

```
#DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS
```

```
#USO CONSUNTIVO
```

```
@NLparameter(bhsf, dem_uc155[i=1:m,j=1:n] == dem_uc_155[1,j])
@NLparameter(bhsf, dem_uc156[i=1:m,j=1:n] == dem_uc_156[1,j])
@NLparameter(bhsf, dem_uc162[i=1:m,j=1:n] == dem_uc_162[1,j])
@NLparameter(bhsf, dem_uc169[i=1:m,j=1:n] == dem_uc_169[1,j])
@NLparameter(bhsf, dem_uc172[i=1:m,j=1:n] == dem_uc_172[1,j])
@NLparameter(bhsf, dem_uc176[i=1:m,j=1:n] == dem_uc_176[1,j])
@NLparameter(bhsf, dem_uc178[i=1:m,j=1:n] == dem_uc_178[1,j])
```

```
#TRANSPOSIÇÃO
```

```
@NLparameter(bhsf, dem_transp155[i=1:m,j=1:n] == dem_transp_155[1,j])
@NLparameter(bhsf, dem_transp156[i=1:m,j=1:n] == dem_transp_156[1,j])
@NLparameter(bhsf, dem_transp162[i=1:m,j=1:n] == dem_transp_162[1,j])
@NLparameter(bhsf, dem_transp169[i=1:m,j=1:n] == dem_transp_169[1,j])
@NLparameter(bhsf, dem_transp172[i=1:m,j=1:n] == dem_transp_172[1,j])
@NLparameter(bhsf, dem_transp176[i=1:m,j=1:n] == dem_transp_176[1,j])
@NLparameter(bhsf, dem_transp178[i=1:m,j=1:n] == dem_transp_178[1,j])
```

```
#REFORÇO MÁXIMO
```

```
@NLparameter(bhsf, ref_max155[i=1:m,j=1:n] == ref_max_155[1,j])
@NLparameter(bhsf, ref_max156[i=1:m,j=1:n] == ref_max_156[1,j])
@NLparameter(bhsf, ref_max162[i=1:m,j=1:n] == ref_max_162[1,j])
@NLparameter(bhsf, ref_max169[i=1:m,j=1:n] == ref_max_169[1,j])
@NLparameter(bhsf, ref_max172[i=1:m,j=1:n] == ref_max_172[1,j])
@NLparameter(bhsf, ref_max176[i=1:m,j=1:n] == ref_max_176[1,j])
```

```

@NLparameter(bhsf, ref_max178[i=1:m,j=1:n] == ref_max_178[1,j])
#DEFINIÇÃO DAS ALTURAS DE VOLUMES FIXOS
@NLparameter(bhsf, h_176[i=1:m, j=1:n] == 251.50)
@NLparameter(bhsf, h_178[i=1:m, j=1:n] == 138.00)
@NLparameter(bhsf, area_176[i=1:m, j=1:n] == 213.00)
@NLparameter(bhsf, area_178[i=1:m, j=1:n] == 60.00)
#DEFINIR A FUNÇÃO OBJETIVO
@NLobjective(bhsf, Min, sum((z_155[i,j] + z_156[i,j] + z_162[i,j] + z_169[i,j] + z_172[i,j] + z_176[i,j] +
z_178[i,j]) for i=1:m for j=1:n))

#DEFINIR AS RESTRIÇÕES
for i=1:m
  for j=1:n
    @NLconstraint(bhsf, uc_155[i,j] <= dem_uc155[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, uc_156[i,j] <= dem_uc156[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, uc_162[i,j] <= dem_uc162[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, uc_169[i,j] <= dem_uc169[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, uc_172[i,j] <= dem_uc172[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, uc_176[i,j] <= dem_uc176[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, uc_178[i,j] <= dem_uc178[1,j])

    @NLconstraint(bhsf, transp_155[i,j] <= dem_transp155[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, transp_156[i,j] <= dem_transp156[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, transp_162[i,j] <= dem_transp162[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, transp_169[i,j] <= dem_transp169[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, transp_172[i,j] <= dem_transp172[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, transp_176[i,j] <= dem_transp176[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, transp_178[i,j] <= dem_transp178[1,j])

    @NLconstraint(bhsf, ref_155[i,j] <= ref_max155[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, ref_156[i,j] <= ref_max156[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, ref_162[i,j] <= ref_max162[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, ref_169[i,j] <= ref_max169[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, ref_172[i,j] <= ref_max172[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, ref_176[i,j] <= ref_max176[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, ref_178[i,j] <= ref_max178[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, 0.0 <= vaz_turb_155[i,j] <= vaz_turb_max_155[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, 0.0 <= vaz_turb_156[i,j] <= vaz_turb_max_156[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, 0.0 <= vaz_turb_162[i,j] <= vaz_turb_max_162[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, 0.0 <= vaz_turb_169[i,j] <= vaz_turb_max_169[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, 0.0 <= vaz_turb_172[i,j] <= vaz_turb_max_172[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, 0.0 <= vaz_turb_176[i,j] <= vaz_turb_max_176[1,j])
    @NLconstraint(bhsf, 0.0 <= vaz_turb_178[i,j] <= vaz_turb_max_178[1,j])

    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_fin_155[i,j] - vol_arm_ini_155[i,j] + vol_evap_155[i,j] - ((vaz_nat_155[i,j] -
uc_155[i,j] - vaz_jus_155[i,j] - transp_155[i,j] + ref_155[i,j])*tempo1[1,j]) == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_fin_156[i,j] - vol_arm_ini_156[i,j] + vol_evap_156[i,j] - ((vaz_nat_156[i,j] -
vaz_nat_155[i,j] + vaz_jus_155[i,j] - uc_156[i,j] - vaz_jus_156[i,j] - transp_156[i,j] + ref_156[i,j])*tempo1[1,j])
== 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_fin_162[i,j] - vol_arm_ini_162[i,j] + vol_evap_162[i,j] - ((vaz_nat_162[i,j] -
uc_162[i,j] - vaz_jus_162[i,j] - transp_162[i,j] + ref_162[i,j])*tempo1[1,j]) == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_fin_169[i,j] - vol_arm_ini_169[i,j] + vol_evap_169[i,j] - ((vaz_nat_169[i,j] -
vaz_nat_156[i,j] - vaz_nat_162[i,j] + vaz_jus_156[i,j] + vaz_jus_162[i,j] - uc_169[i,j] - vaz_jus_169[i,j] -
transp_169[i,j] + ref_169[i,j])*tempo1[1,j]) == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_fin_172[i,j] - vol_arm_ini_172[i,j] + vol_evap_172[i,j] - ((vaz_nat_172[i,j] -
vaz_nat_169[i,j] + vaz_jus_169[i,j] - uc_172[i,j] - vaz_jus_172[i,j] - transp_172[i,j] + ref_172[i,j])*tempo1[1,j])
== 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_fin_176[i,j] - vol_arm_ini_176[i,j] + vol_evap_176[i,j] - ((vaz_nat_176[i,j] -
vaz_nat_172[i,j] + vaz_jus_172[i,j] - uc_176[i,j] - vaz_jus_176[i,j] - transp_176[i,j] + ref_176[i,j])*tempo1[1,j])
== 0.0)

```

@NLconstraint(bhsf, vol_arm_fin_178[i,j] - vol_arm_ini_178[i,j] + vol_evap_178[i,j] - ((vaz_nat_178[i,j] - vaz_nat_176[i,j] + vaz_jus_176[i,j] - uc_178[i,j] - vaz_jus_178[i,j] - transp_178[i,j] + ref_178[i,j])*tempo1[1,j]) == 0.0)

@NLconstraint(bhsf, h_155[i,j] - 604.246561929021 - 0.0489356308668356*vol_arm_ini_155[i,j] == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, h_156[i,j] - 545.150939716336 - 0.00147833072620418*vol_arm_ini_156[i,j] == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, h_162[i,j] - 810.057159555812 - 0.036344633101955*vol_arm_ini_162[i,j] == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, h_169[i,j] - 379.888221899135 - 0.000395084096872795*vol_arm_ini_169[i,j] == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, h_172[i,j] - 288.797343434361 - 0.00142360006817942*vol_arm_ini_172[i,j] == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, h_176[i,j] - 251.50 == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, h_178[i,j] - 138.00 == 0.0)

@NLconstraint(bhsf, area_155[i,j] + 289.439596294675 - 2.62315600176686*vol_arm_ini_155[i,j] + 0.00550845875916944*vol_arm_ini_155[i,j]^2 == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, area_156[i,j] - 167.268809758092 - 0.0464019164104526*vol_arm_ini_156[i,j] - 7.63833651889608E-10*vol_arm_ini_156[i,j]^2 == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, area_162[i,j] - 12.2522148884643 - 0.0302310677499489*vol_arm_ini_162[i,j] - 0.000112582321601188*vol_arm_ini_162[i,j]^2 == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, area_169[i,j] - 433.599867164179 - 0.130635932930397*vol_arm_ini_169[i,j] + 5.92442501252507E-7*vol_arm_ini_169[i,j]^2 == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, area_172[i,j] - 86.8069999061546 - 0.0818037408509336*vol_arm_ini_172[i,j] + 1.317045866333E-6*vol_arm_ini_172[i,j]^2 == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, area_176[i,j] - 213.00 == 0.00)
 @NLconstraint(bhsf, area_178[i,j] - 60.00 == 0.00)

@NLconstraint(bhsf, vol_evap_155[i,j]*1000/area_155[i,j]/evap_155[1,j] == 1.0)
 @NLconstraint(bhsf, vol_evap_156[i,j]*1000/area_156[i,j]/evap_156[1,j] == 1.0)
 @NLconstraint(bhsf, vol_evap_162[i,j]*1000/area_162[i,j]/evap_162[1,j] == 1.0)
 @NLconstraint(bhsf, vol_evap_162[i,j]*1000/area_162[i,j]/evap_162[1,j] == 1.0)
 @NLconstraint(bhsf, vol_evap_169[i,j]*1000/area_169[i,j]/evap_169[1,j] == 1.0)
 @NLconstraint(bhsf, vol_evap_172[i,j]*1000/area_172[i,j]/evap_172[1,j] == 1.0)
 @NLconstraint(bhsf, vol_evap_176[i,j]*1000/area_176[i,j]/evap_176[1,j] == 1.0)
 @NLconstraint(bhsf, vol_evap_178[i,j]*1000/area_178[i,j]/evap_178[1,j] == 1.0)

@NLconstraint(bhsf, vaz_jus_155[i,j] - vaz_turb_155[i,j] - vaz_vert_155[i,j] == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, vaz_jus_156[i,j] - vaz_turb_156[i,j] - vaz_vert_156[i,j] == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, vaz_jus_162[i,j] - vaz_turb_162[i,j] - vaz_vert_162[i,j] == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, vaz_jus_169[i,j] - vaz_turb_169[i,j] - vaz_vert_169[i,j] == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, vaz_jus_172[i,j] - vaz_turb_172[i,j] - vaz_vert_172[i,j] == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, vaz_jus_176[i,j] - vaz_turb_176[i,j] - vaz_vert_176[i,j] == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, vaz_jus_178[i,j] - vaz_turb_178[i,j] - vaz_vert_178[i,j] == 0.0)

@NLconstraint(bhsf, h_jus_155[i,j] - 576.22 - 0.0307*vaz_jus_155[i,j] + 0.0001*vaz_jus_155[i,j]^2 == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, h_jus_156[i,j] - 514.66 - 0.0016*vaz_jus_156[i,j] + 2.0e-7*vaz_jus_156[i,j]^2 == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, h_jus_162[i,j] - 636.5 - 0.0173*vaz_turb_162[i,j] + -2.0e-5*vaz_turb_162[i,j]^2 == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, h_jus_169[i,j] - 360.59 - 0.0012*vaz_jus_169[i,j] + 7.00e-8*vaz_jus_169[i,j]^2 == 0.0)
 @NLconstraint(bhsf, h_jus_172[i,j] - 251.50 == 0.00)
 @NLconstraint(bhsf, h_jus_176[i,j] - 138.0 == 0.00)
 @NLconstraint(bhsf, h_jus_178[i,j] - 13.794 - 0.0018*vaz_jus_178[i,j] + 2.00e-7*vaz_jus_178[i,j]^2 == 0.0)

@NLconstraint(bhsf, ene_prod_155[i,j]/(9.80665e-3*0.008755e2*vaz_turb_155[i,j]*(h_155[i,j]-h_jus_155[i,j])) == 1.0)
 @NLconstraint(bhsf, ene_prod_156[i,j]/(9.80665e-3*0.008564e2*vaz_turb_156[i,j]*(h_156[i,j]-h_jus_156[i,j])) == 1.0)
 @NLconstraint(bhsf, ene_prod_162[i,j]/(9.80665e-3*0.008829e2*vaz_turb_162[i,j]*(h_162[i,j]-h_jus_162[i,j])) == 1.0)
 @NLconstraint(bhsf, ene_prod_169[i,j]/(9.80665e-3*0.009023e2*vaz_turb_169[i,j]*(h_169[i,j]-h_jus_169[i,j])) == 1.0)
 @NLconstraint(bhsf, ene_prod_172[i,j]/(9.80665e-3*0.008931e2*vaz_turb_172[i,j]*(h_172[i,j]-h_jus_172[i,j])) == 1.0)

```

@NLconstraint(bhsf, ene_prod_176[i,j]/(9.80665e-3*0.009035e2*vaz_turb_176[i,j]*(h_176[i,j]-
h_jus_176[i,j])) == 1.0)
@NLconstraint(bhsf, ene_prod_178[i,j]/(9.80665e-3*0.009119e2*vaz_turb_178[i,j]*(h_178[i,j]-
h_jus_178[i,j])) == 1.0)

@NLconstraint(bhsf, z_155[i,j] == ((dem_uc155[i,j]-uc_155[i,j])/dem_uc155[i,j])^2 + (((38.5 -
ene_prod_155[i,j])/38.5)^2) + (((vaz_jus_155[i,j]-27.67)/27.67)^2))
@NLconstraint(bhsf, z_156[i,j] == ((dem_uc156[i,j]-uc_156[i,j])/dem_uc156[i,j])^2 + (((239.0 -
ene_prod_156[i,j])/239.0)^2) + (((vaz_jus_156[i,j]-300.00)/300.00)^2))
@NLconstraint(bhsf, z_162[i,j] == ((dem_uc162[i,j]-uc_162[i,j])/dem_uc162[i,j])^2 + (((58.0 -
ene_prod_162[i,j])/58.0)^2) + (((vaz_jus_162[i,j]-8.80)/8.80)^2))
@NLconstraint(bhsf, z_169[i,j] == ((dem_uc169[i,j]-uc_169[i,j])/dem_uc169[i,j])^2 + (((531.0 -
ene_prod_169[i,j])/531.0)^2) + (((vaz_jus_169[i,j]-1300.00)/1300.00)^2))
@NLconstraint(bhsf, z_172[i,j] == ((dem_uc172[i,j]-uc_172[i,j])/dem_uc172[i,j])^2 + (((959.0 -
ene_prod_172[i,j])/959.0)^2) + (((vaz_jus_172[i,j]-1300.00)/1300.00)^2))
@NLconstraint(bhsf, z_176[i,j] == ((dem_uc176[i,j]-uc_176[i,j])/dem_uc176[i,j])^2 + (((2225.0 -
ene_prod_176[i,j])/2225.0)^2) + (((vaz_jus_176[i,j]-1300.00)/1300.00)^2))
@NLconstraint(bhsf, z_178[i,j] == ((dem_uc178[i,j]-uc_178[i,j])/dem_uc178[i,j])^2 + (((2139.0 -
ene_prod_178[i,j])/2139.0)^2) + (((vaz_jus_178[i,j]-1300.00)/1300.00)^2))

if i<m
  if j<n
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_155[i,j+1] - vol_arm_fin_155[i,j] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_156[i,j+1] - vol_arm_fin_156[i,j] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_162[i,j+1] - vol_arm_fin_162[i,j] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_169[i,j+1] - vol_arm_fin_169[i,j] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_172[i,j+1] - vol_arm_fin_172[i,j] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_176[i,j+1] - vol_arm_fin_176[i,j] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_178[i,j+1] - vol_arm_fin_178[i,j] == 0.0)
  elseif j==n
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_155[i+1,1] - vol_arm_fin_155[i,j] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_156[i+1,1] - vol_arm_fin_156[i,j] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_162[i+1,1] - vol_arm_fin_162[i,j] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_169[i+1,1] - vol_arm_fin_169[i,j] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_172[i+1,1] - vol_arm_fin_172[i,j] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_176[i+1,1] - vol_arm_fin_176[i,j] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_178[i+1,1] - vol_arm_fin_178[i,j] == 0.0)
  end
elseif i==m
  if j==n
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_155[i,j] - vol_arm_fin_155[i,j-1] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_156[i,j] - vol_arm_fin_156[i,j-1] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_162[i,j] - vol_arm_fin_162[i,j-1] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_169[i,j] - vol_arm_fin_169[i,j-1] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_172[i,j] - vol_arm_fin_172[i,j-1] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_176[i,j] - vol_arm_fin_176[i,j-1] == 0.0)
    @NLconstraint(bhsf, vol_arm_ini_178[i,j] - vol_arm_fin_178[i,j-1] == 0.0)
  end
end
end
end

#RESOLVER O PROBLEMA
status = solve(bhsf)

println("Objective value: ", getobjectivevalue(bhsf))

writedlm("Volume_Final_155.csv", getvalue(vol_arm_fin_155), ';')
writedlm("Vazao_para_UC_155.csv", getvalue(uc_155), ';')
writedlm("Demanda_de_UC_155.csv", (dem_uc_155), ';')

```

```
writedlm("Vazao_para_Transposiçao_155.csv", getvalue(transp_155), ';')
writedlm("Demanda_da_Transposiçao_155.csv", (dem_transp_155), ';')
writedlm("Vazao_de_Reforço_155.csv", getvalue(ref_155), ';')
writedlm("Vazao_Max_Reforço_155.csv", (ref_max_155), ';')
writedlm("Vazao_Turbinada_155.csv", getvalue(vaz_turb_155), ';')
writedlm("Vazao_Vertida_155.csv", getvalue(vaz_vert_155), ';')
writedlm("Vazao_de_Jusante_155.csv", getvalue(vaz_jus_155), ';')
writedlm("Energia_Produzida_155.csv", getvalue(ene_prod_155), ';')
```

```
writedlm("Volume_Final_156.csv", getvalue(vol_arm_fin_156), ';')
writedlm("Vazao_para_UC_156.csv", getvalue(uc_156), ';')
writedlm("Demanda_de_UC_156.csv", (dem_uc_156), ';')
writedlm("Vazao_para_Transposiçao_156.csv", getvalue(transp_156), ';')
writedlm("Demanda_da_Transposiçao_156.csv", (dem_transp_156), ';')
writedlm("Vazao_de_Reforço_156.csv", getvalue(ref_156), ';')
writedlm("Vazao_Max_Reforço_156.csv", (ref_max_156), ';')
writedlm("Vazao_Turbinada_156.csv", getvalue(vaz_turb_156), ';')
writedlm("Vazao_Vertida_156.csv", getvalue(vaz_vert_156), ';')
writedlm("Vazao_de_Jusante_156.csv", getvalue(vaz_jus_156), ';')
writedlm("Energia_Produzida_156.csv", getvalue(ene_prod_156), ';')
```

```
writedlm("Volume_Final_162.csv", getvalue(vol_arm_fin_162), ';')
writedlm("Vazao_para_UC_162.csv", getvalue(uc_162), ';')
writedlm("Demanda_de_UC_162.csv", (dem_uc_162), ';')
writedlm("Vazao_para_Transposiçao_162.csv", getvalue(transp_162), ';')
writedlm("Demanda_da_Transposiçao_162.csv", (dem_transp_162), ';')
writedlm("Vazao_de_Reforço_162.csv", getvalue(ref_162), ';')
writedlm("Vazao_Max_Reforço_162.csv", (ref_max_162), ';')
writedlm("Vazao_Turbinada_162.csv", getvalue(vaz_turb_162), ';')
writedlm("Vazao_Vertida_162.csv", getvalue(vaz_vert_162), ';')
writedlm("Vazao_de_Jusante_162.csv", getvalue(vaz_jus_162), ';')
writedlm("Energia_Produzida_162.csv", getvalue(ene_prod_162), ';')
```

```
writedlm("Volume_Final_169.csv", getvalue(vol_arm_fin_169), ';')
writedlm("Vazao_para_UC_169.csv", getvalue(uc_169), ';')
writedlm("Demanda_de_UC_169.csv", (dem_uc_169), ';')
writedlm("Vazao_para_Transposiçao_169.csv", getvalue(transp_169), ';')
writedlm("Demanda_da_Transposiçao_169.csv", (dem_transp_169), ';')
writedlm("Vazao_de_Reforço_169.csv", getvalue(ref_169), ';')
writedlm("Vazao_Max_Reforço_169.csv", (ref_max_169), ';')
writedlm("Vazao_Turbinada_169.csv", getvalue(vaz_turb_169), ';')
writedlm("Vazao_Vertida_169.csv", getvalue(vaz_vert_169), ';')
writedlm("Vazao_de_Jusante_169.csv", getvalue(vaz_jus_169), ';')
writedlm("Energia_Produzida_169.csv", getvalue(ene_prod_169), ';')
```

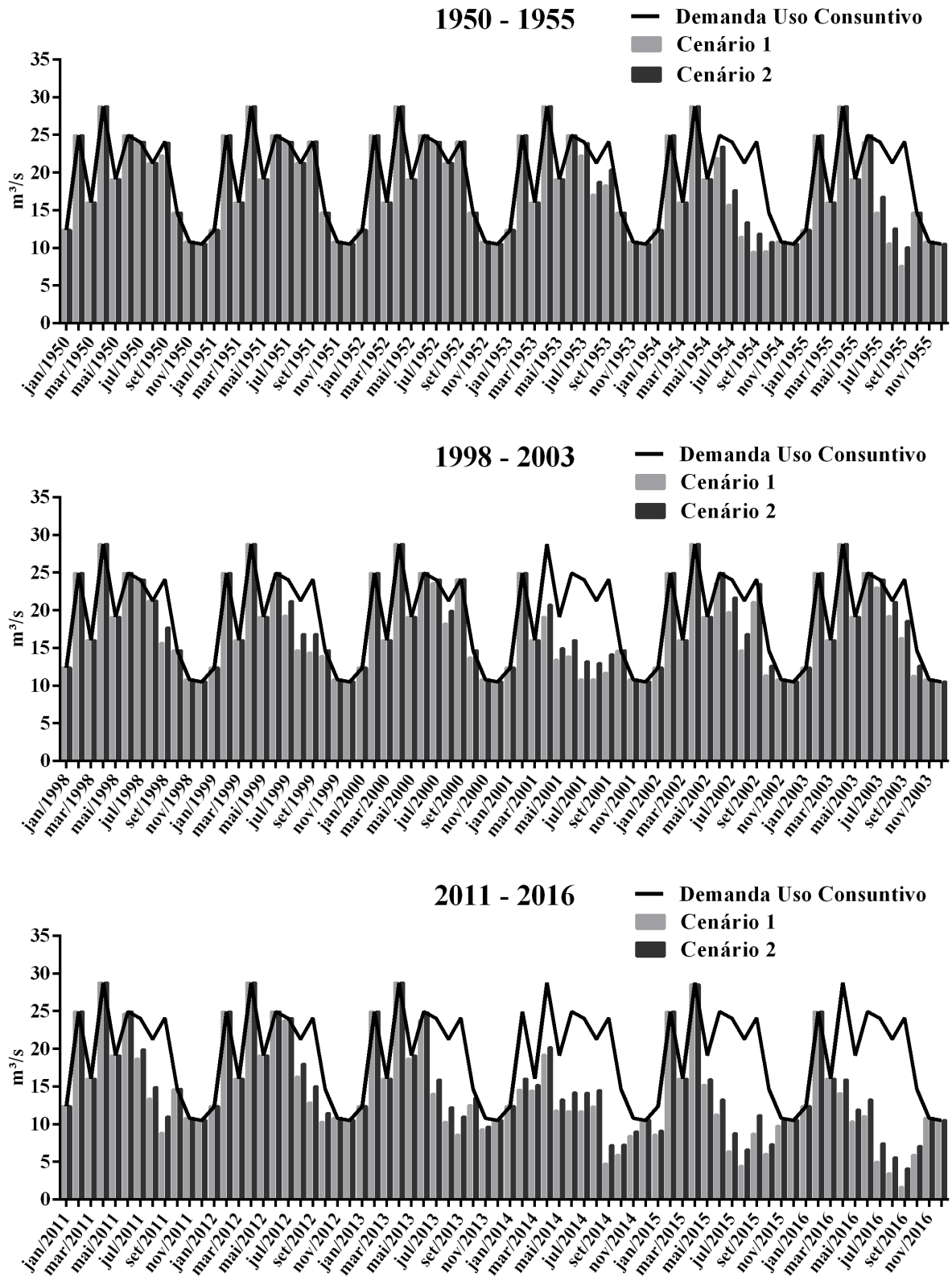
```
writedlm("Volume_Final_172.csv", getvalue(vol_arm_fin_172), ';')
writedlm("Vazao_para_UC_172.csv", getvalue(uc_172), ';')
writedlm("Demanda_de_UC_172.csv", (dem_uc_172), ';')
writedlm("Vazao_para_Transposiçao_172.csv", getvalue(transp_172), ';')
writedlm("Demanda_da_Transposiçao_172.csv", (dem_transp_172), ';')
writedlm("Vazao_de_Reforço_172.csv", getvalue(ref_172), ';')
writedlm("Vazao_Max_Reforço_172.csv", (ref_max_172), ';')
writedlm("Vazao_Turbinada_172.csv", getvalue(vaz_turb_172), ';')
writedlm("Vazao_Vertida_172.csv", getvalue(vaz_vert_172), ';')
writedlm("Vazao_de_Jusante_172.csv", getvalue(vaz_jus_172), ';')
writedlm("Energia_Produzida_172.csv", getvalue(ene_prod_172), ';')
```

```
writedlm("Volume_Final_176.csv", getvalue(vol_arm_fin_176), ';')
writedlm("Vazao_para_UC_176.csv", getvalue(uc_176), ';')
writedlm("Demanda_de_UC_176.csv", (dem_uc_176), ';')
```

```
writedlm("Vazao_para_Transposiçao_176.csv", getvalue(transp_176) , ';')
writedlm("Demanda_da_Transposiçao_176.csv", (dem_transp_176) , ';')
writedlm("Vazao_de_Reforço_176.csv", getvalue(ref_176) , ';')
writedlm("Vazao_Max_Reforço_176.csv", (ref_max_176) , ';')
writedlm("Vazao_Turbinada_176.csv", getvalue(vaz_turb_176) , ';')
writedlm("Vazao_Vertida_176.csv", getvalue(vaz_vert_176) , ';')
writedlm("Vazao_de_Jusante_176.csv", getvalue(vaz_jus_176) , ';')
writedlm("Energia_Produzida_176.csv", getvalue(ene_prod_176) , ';')
```

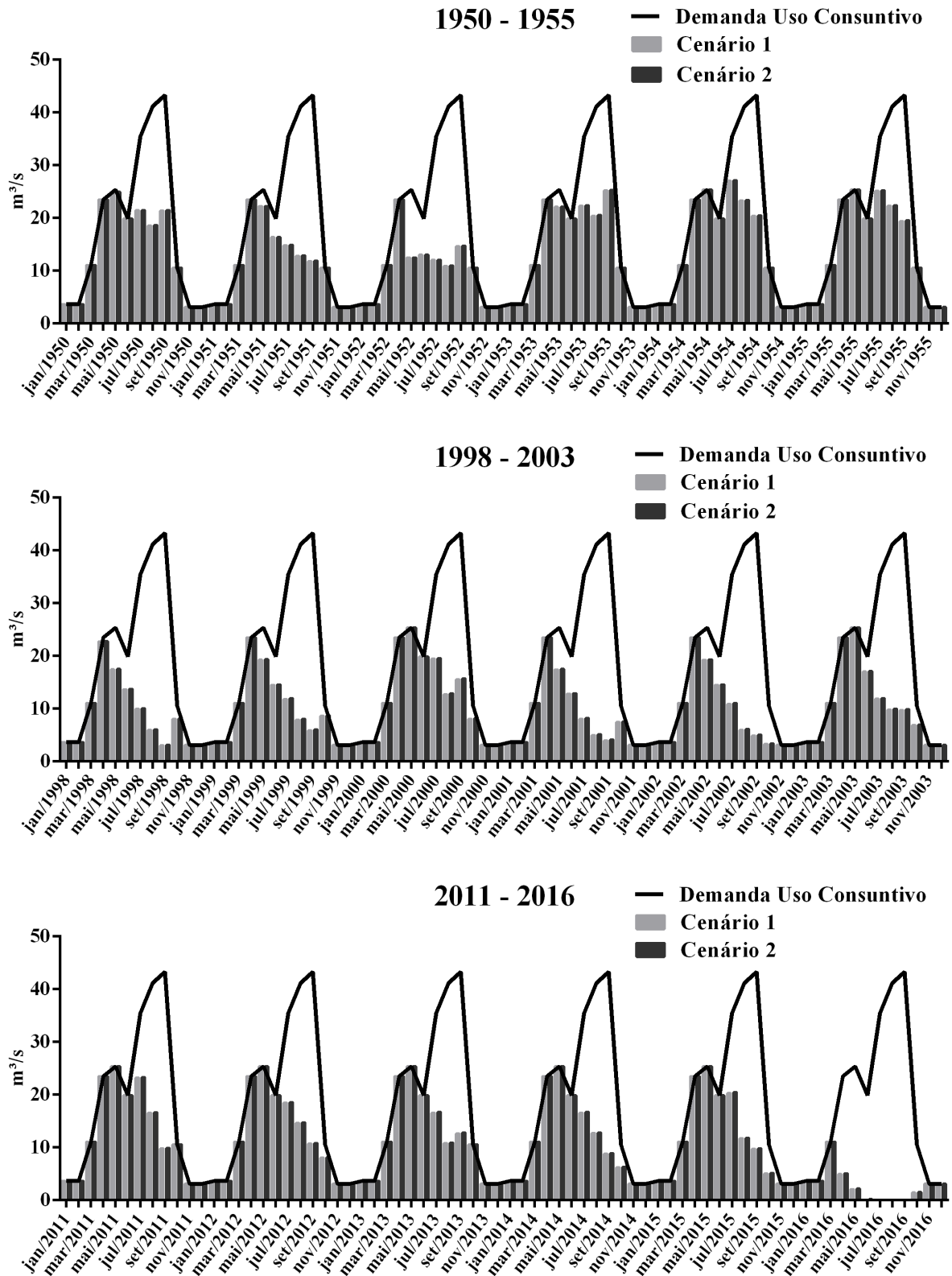
```
writedlm("Volume_Final_178.csv", getvalue(vol_arm_fin_178) , ';')
writedlm("Vazao_para_UC_178.csv", getvalue(uc_178) , ';')
writedlm("Demanda_de_UC_178.csv", (dem_uc_178) , ';')
writedlm("Vazao_para_Transposiçao_178.csv", getvalue(transp_178) , ';')
writedlm("Demanda_da_Transposiçao_178.csv", (dem_transp_178) , ';')
writedlm("Vazao_de_Reforço_178.csv", getvalue(ref_178) , ';')
writedlm("Vazao_Max_Reforço_178.csv", (ref_max_178) , ';')
writedlm("Vazao_Turbinada_178.csv", getvalue(vaz_turb_178) , ';')
writedlm("Vazao_Vertida_178.csv", getvalue(vaz_vert_178) , ';')
writedlm("Vazao_de_Jusante_178.csv", getvalue(vaz_jus_178) , ';')
writedlm("Energia_Produzida_178.csv", getvalue(ene_prod_178) , ';')
```

Apêndice 2 - Vazões Disponibilizadas para atendimento de UC - Retiro Baixo



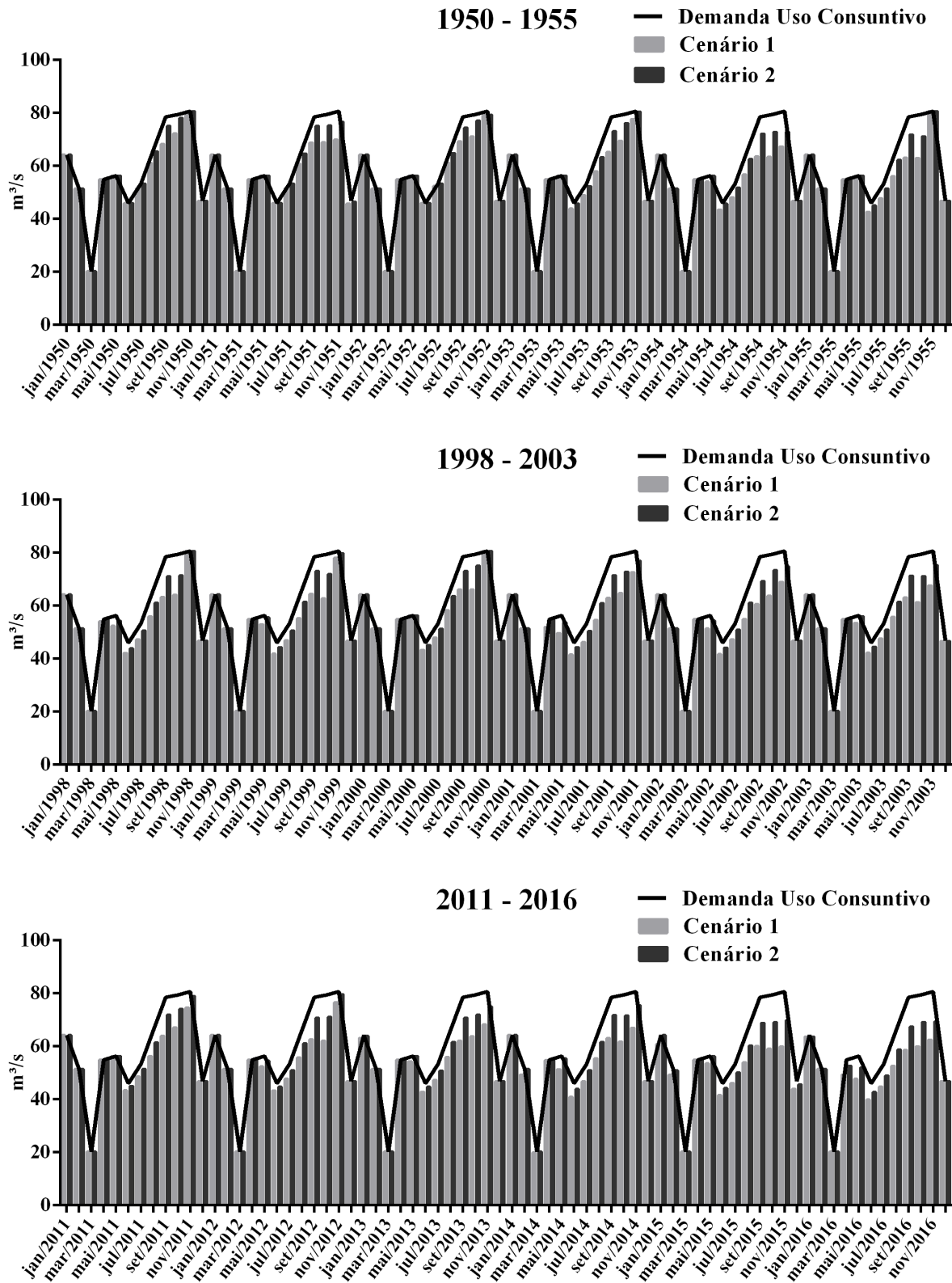
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 3 - Vazões Disponibilizadas para atendimento de UC – Queimado



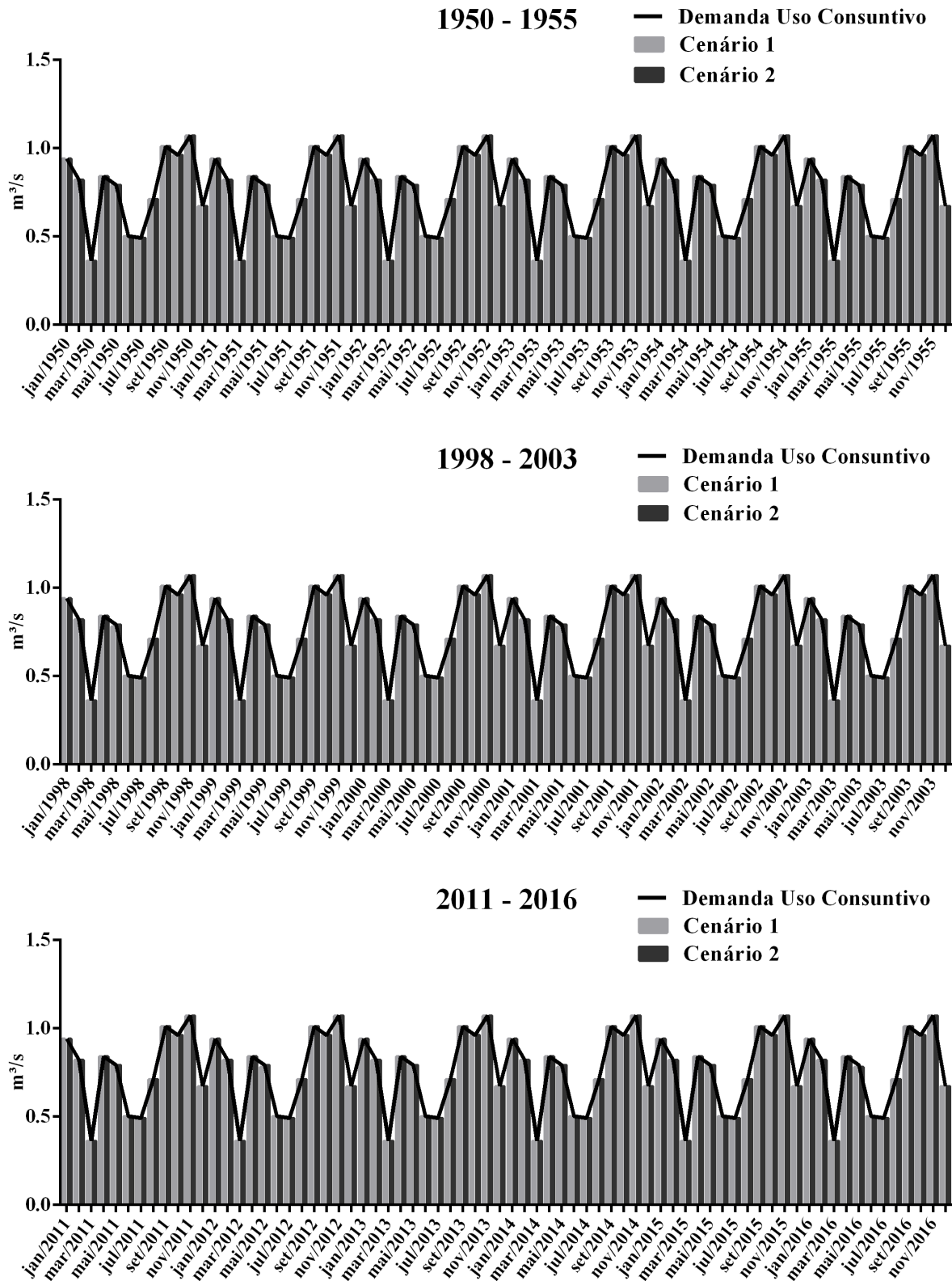
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 4 - Vazões Disponibilizadas para atendimento de UC – Itaparica



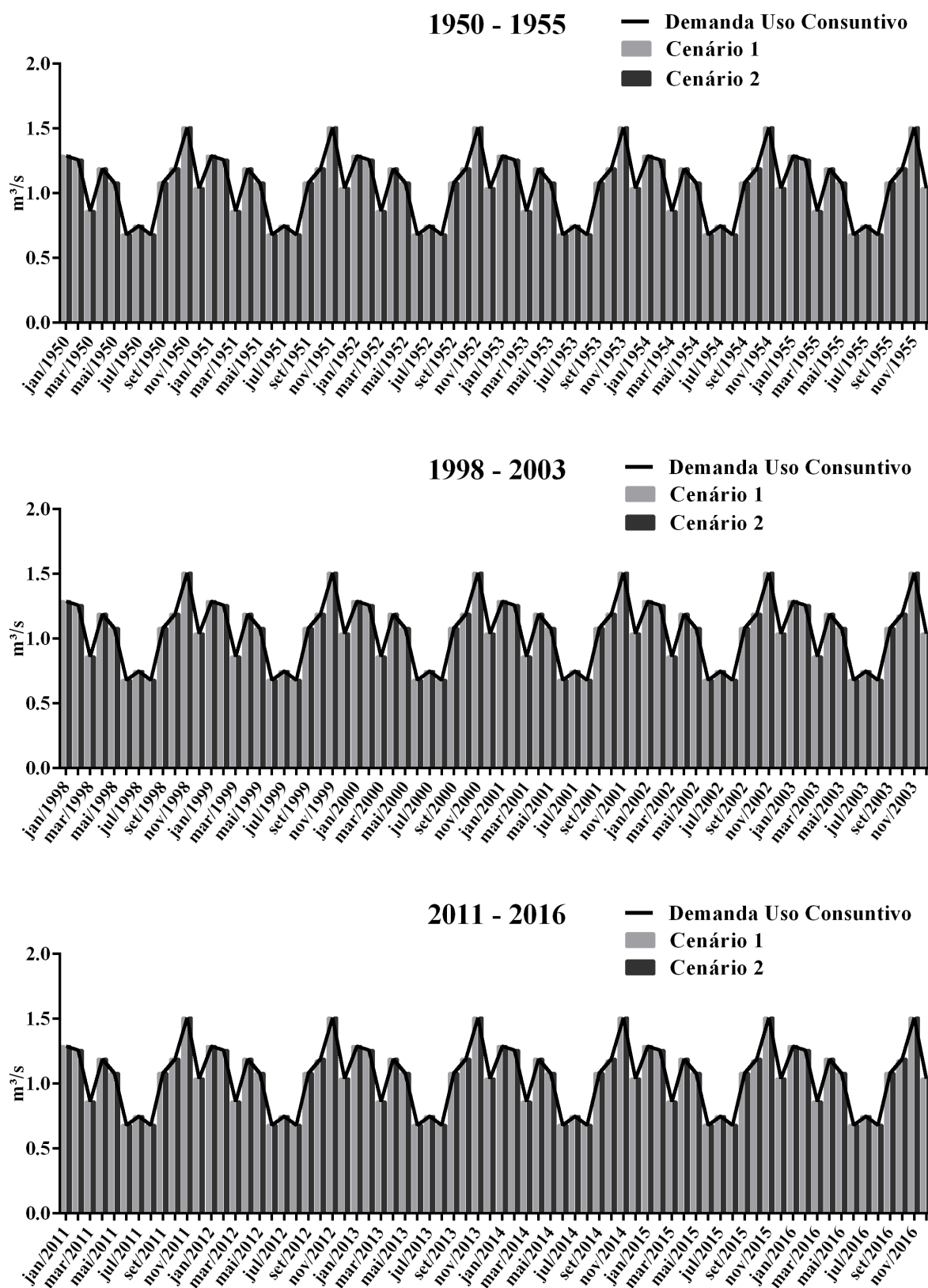
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 5 - Vazões Disponibilizadas para atendimento de UC - C. P. Afonso/Moxotó



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 6 - Vazões Disponibilizadas para atendimento de UC – Xingó



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

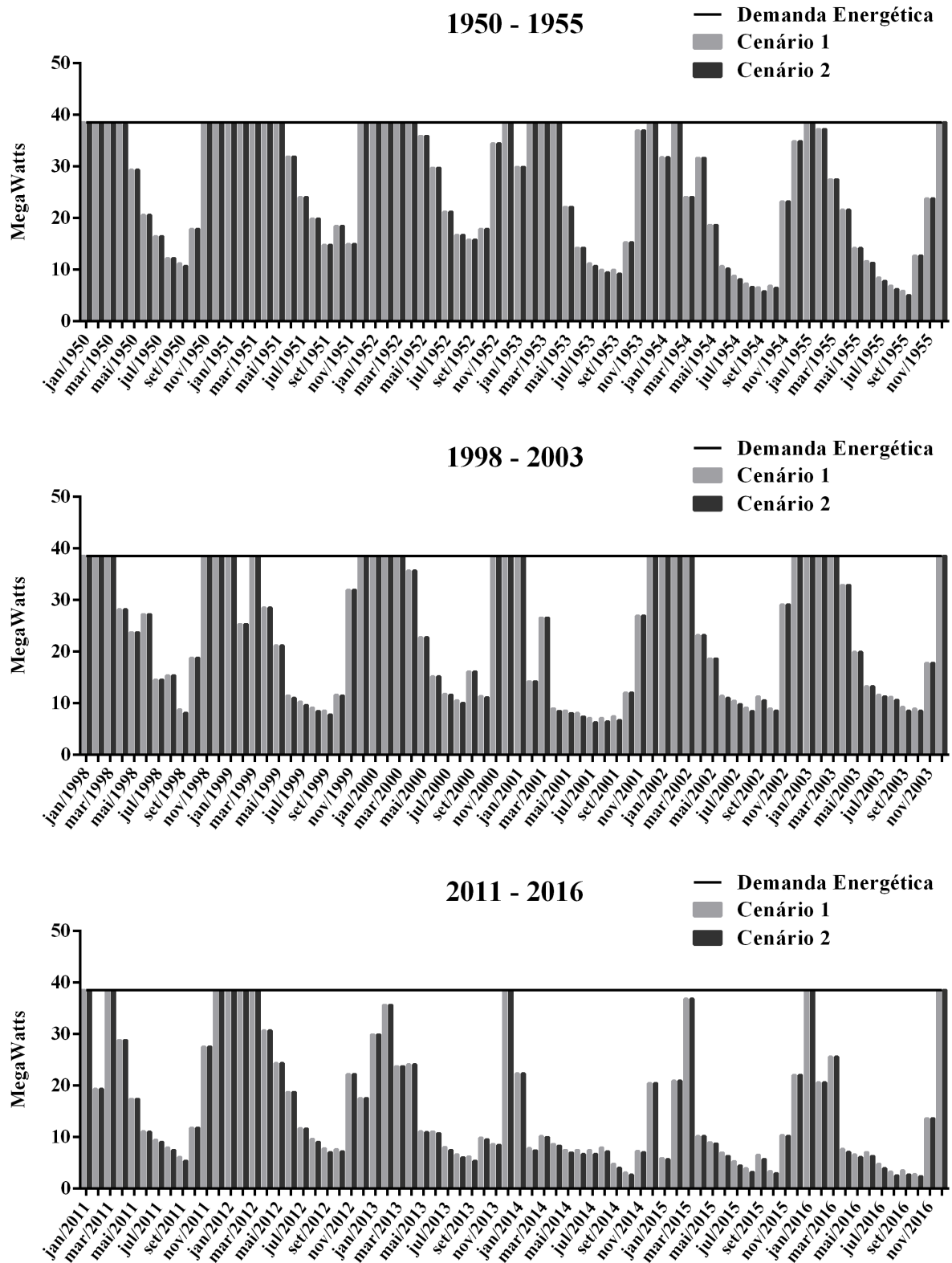
Apêndice 7 - Índices de Desempenho para UC

Código		Período	Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
155	CENÁRIO 01	50-55	81.94%	30.77%	31.53%
		98-03	65.28%	28.00%	23.30%
		11-16	41.67%	16.67%	40.76%
	CENÁRIO 02	50-55	83.33%	33.33%	25.48%
		98-03	75.00%	33.33%	21.85%
		11-16	47.22%	18.42%	37.35%
162	CENÁRIO 01	50-55	66.67%	33.33%	44.23%
		98-03	52.78%	17.65%	53.84%
		11-16	65.28%	24.00%	69.08%
	CENÁRIO 02	50-55	66.67%	33.33%	44.05%
		98-03	52.78%	17.65%	53.42%
		11-16	65.28%	24.00%	68.70%
172	CENÁRIO 01	50-55	51.39%	17.14%	9.73%
		98-03	41.67%	11.90%	12.72%
		11-16	29.17%	15.69%	12.73%
	CENÁRIO 02	50-55	54.17%	18.18%	3.59%
		98-03	44.44%	12.50%	5.66%
		11-16	36.11%	19.57%	6.36%
176	CENÁRIO 01	50-55	100.00%	-	-
		98-03	94.44%	100.00%	1.27%
		11-16	95.83%	100.00%	1.27%
	CENÁRIO 02	50-55	100.00%	-	-
		98-03	100.00%	-	-
		11-16	98.61%	100.00%	1.27%
178	CENÁRIO 01	50-55	100.00%	-	-
		98-03	98.61%	100.00%	0.84%
		11-16	94.44%	100.00%	0.84%
	CENÁRIO 02	50-55	100.00%	-	-
		98-03	100.00%	-	-
		11-16	100.00%	-	-

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

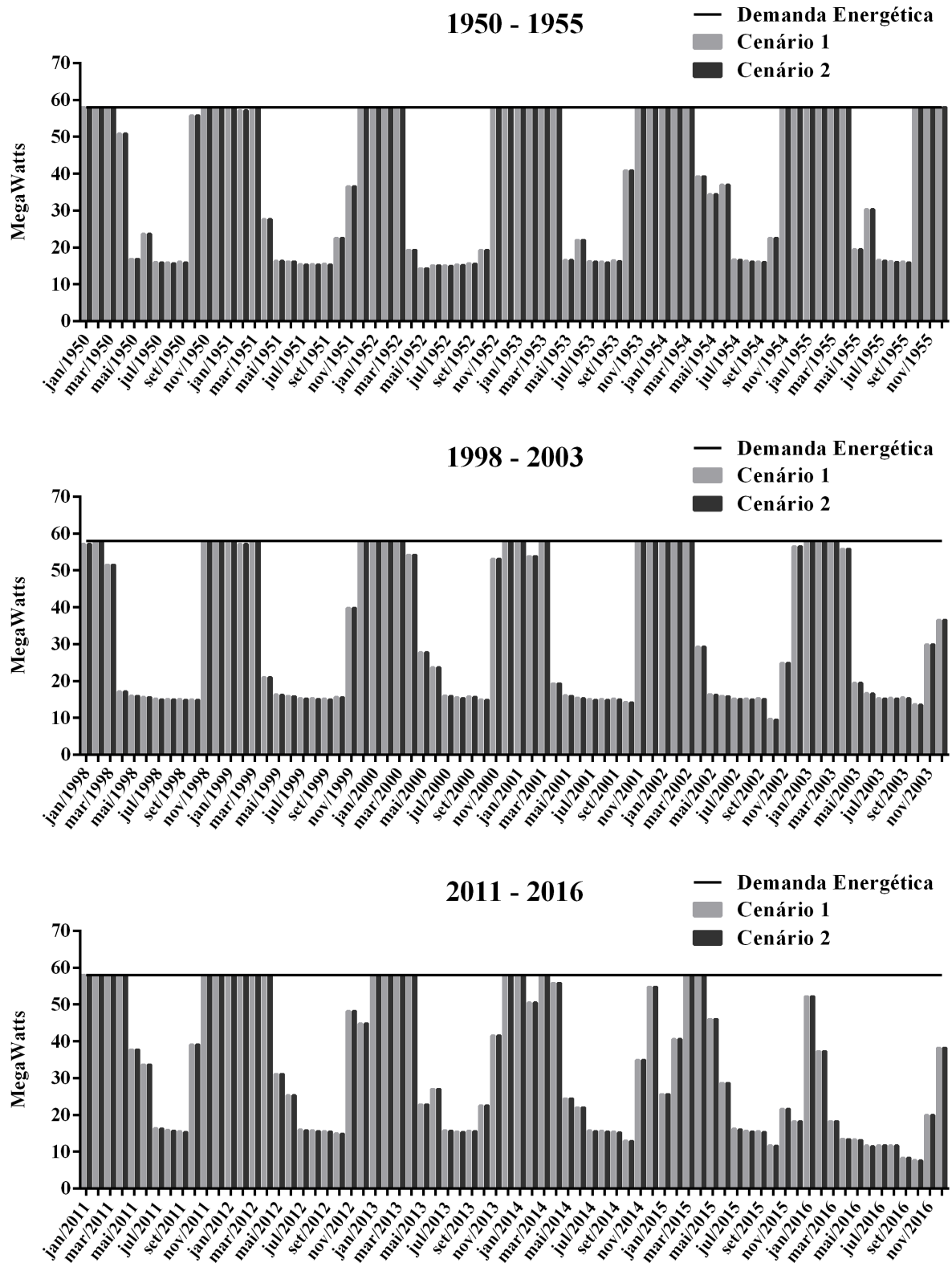
*valores não preenchidos se referem a atendimento totalmente satisfatório

Apêndice 8 – Energia Gerada para atendimento à Garantia Física - Retiro Baixo



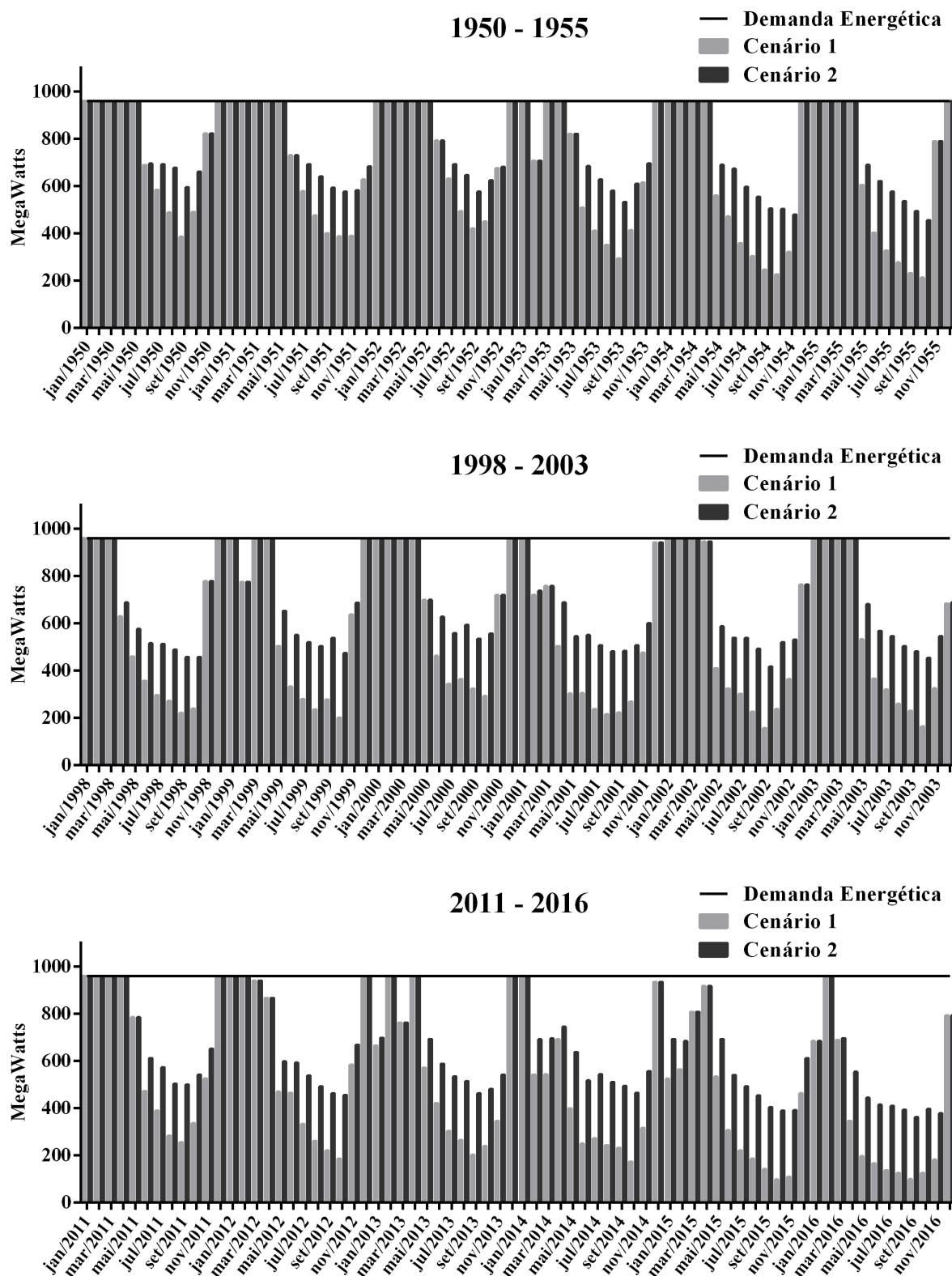
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 9– Energia Gerada para atendimento à Garantia Física - Queimado



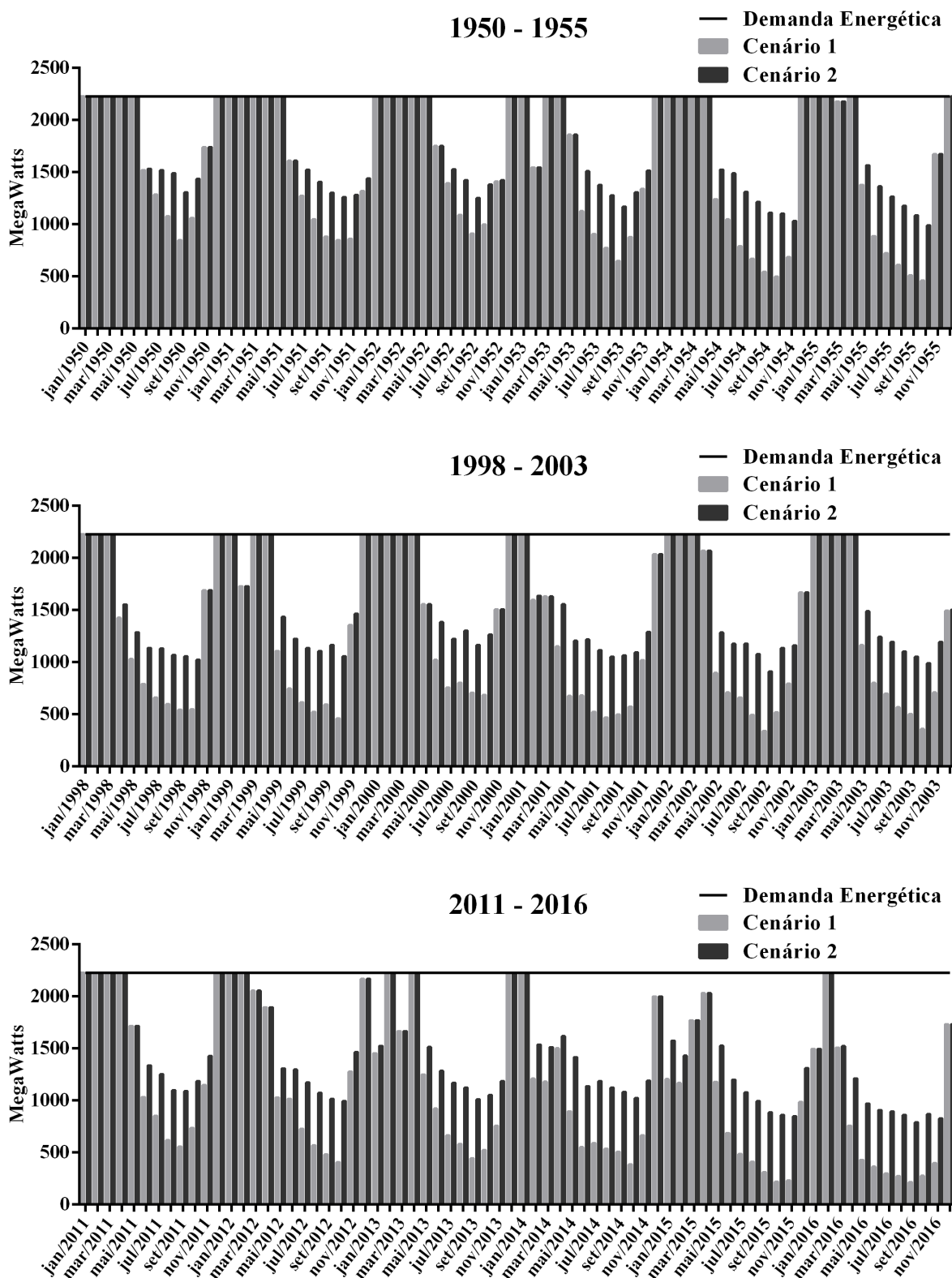
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 10 – Energia Gerada para atendimento à Garantia Física - Itaparica



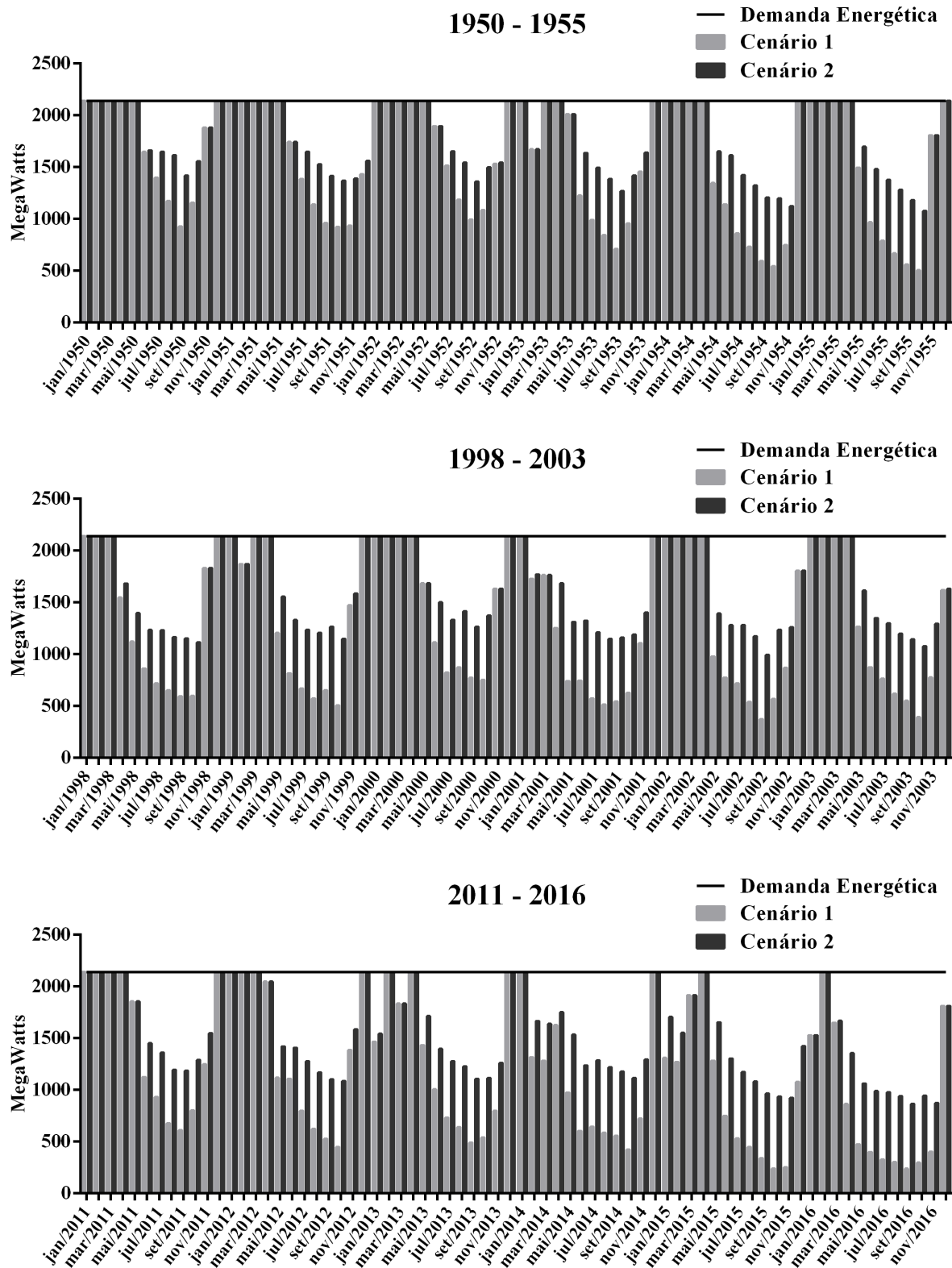
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 11– Energia Gerada para atendimento à Garantia Física - P. Afonso/Moxotó



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 12– Energia Gerada para atendimento à Garantia Física - Xingó



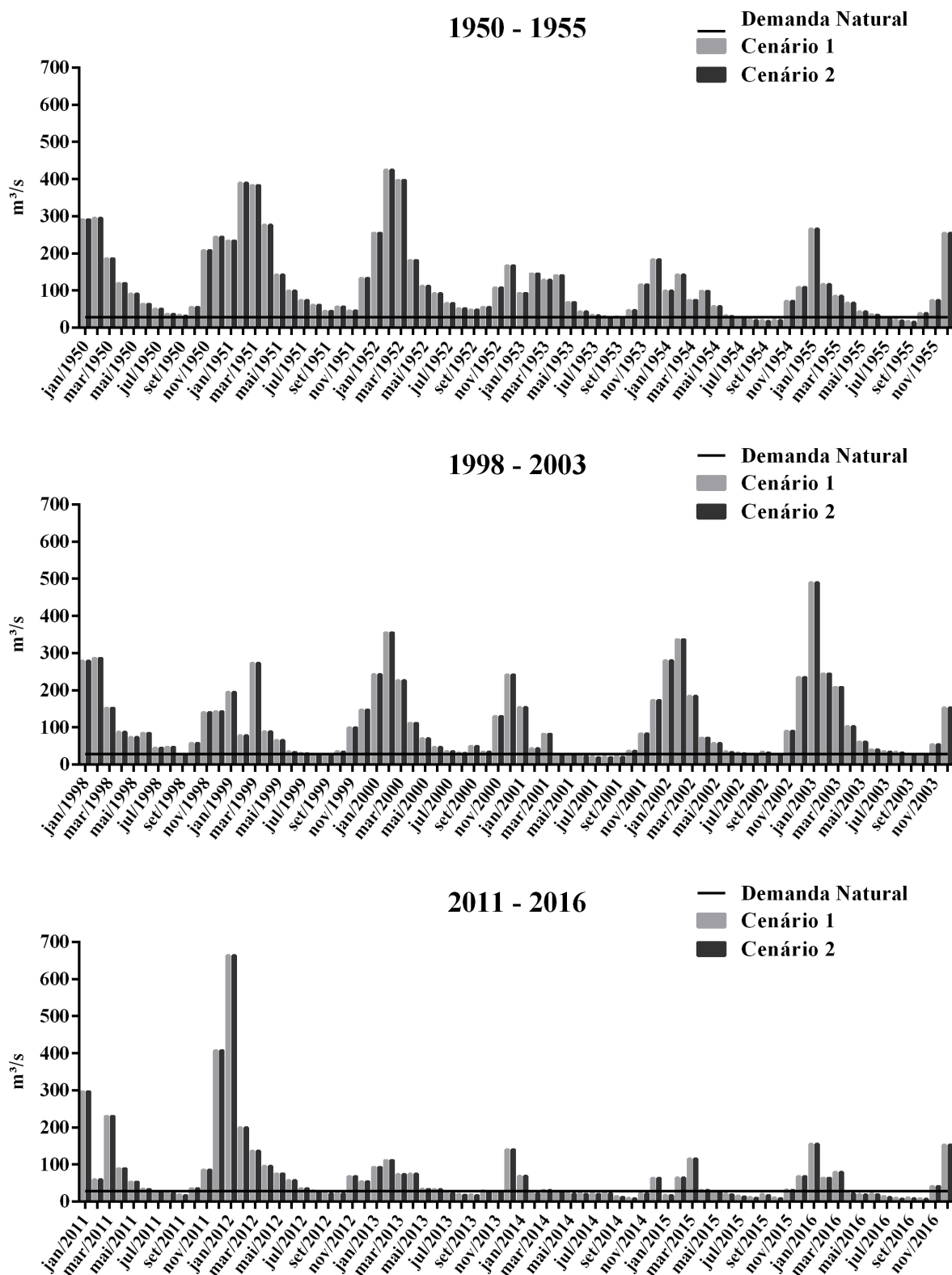
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 13 - Índices de Desempenho para Garantia Física

Código		Período	Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
155	CENÁRIO 01	50-55	31.94%	16.33%	48.94%
		98-03	31.94%	14.29%	58.10%
		11-16	12.50%	7.94%	66.44%
	CENÁRIO 02	50-55	31.94%	16.33%	49.35%
		98-03	31.94%	14.29%	58.81%
		11-16	12.50%	7.94%	67.28%
162	CENÁRIO 01	50-55	41.67%	16.67%	59.03%
		98-03	26.39%	16.98%	58.10%
		11-16	23.61%	9.09%	55.13%
	CENÁRIO 02	50-55	41.67%	16.67%	59.15%
		98-03	26.39%	16.98%	58.29%
		11-16	23.61%	9.09%	55.26%
172	CENÁRIO 01	50-55	41.67%	19.05%	48.12%
		98-03	29.17%	11.76%	56.62%
		11-16	16.67%	8.33%	56.43%
	CENÁRIO 02	50-55	41.67%	19.05%	32.96%
		98-03	29.17%	11.76%	38.64%
		11-16	16.67%	8.33%	38.56%
176	CENÁRIO 01	50-55	41.67%	19.05%	50.99%
		98-03	29.17%	11.76%	58.90%
		11-16	16.67%	8.33%	58.90%
	CENÁRIO 02	50-55	41.67%	19.05%	36.70%
		98-03	29.17%	11.76%	41.95%
		11-16	16.67%	8.33%	42.06%
178	CENÁRIO 01	50-55	43.06%	17.07%	45.92%
		98-03	31.94%	12.24%	55.80%
		11-16	22.22%	14.29%	57.79%
	CENÁRIO 02	50-55	43.06%	17.07%	29.53%
		98-03	31.94%	12.24%	35.98%
		11-16	22.22%	14.29%	37.48%

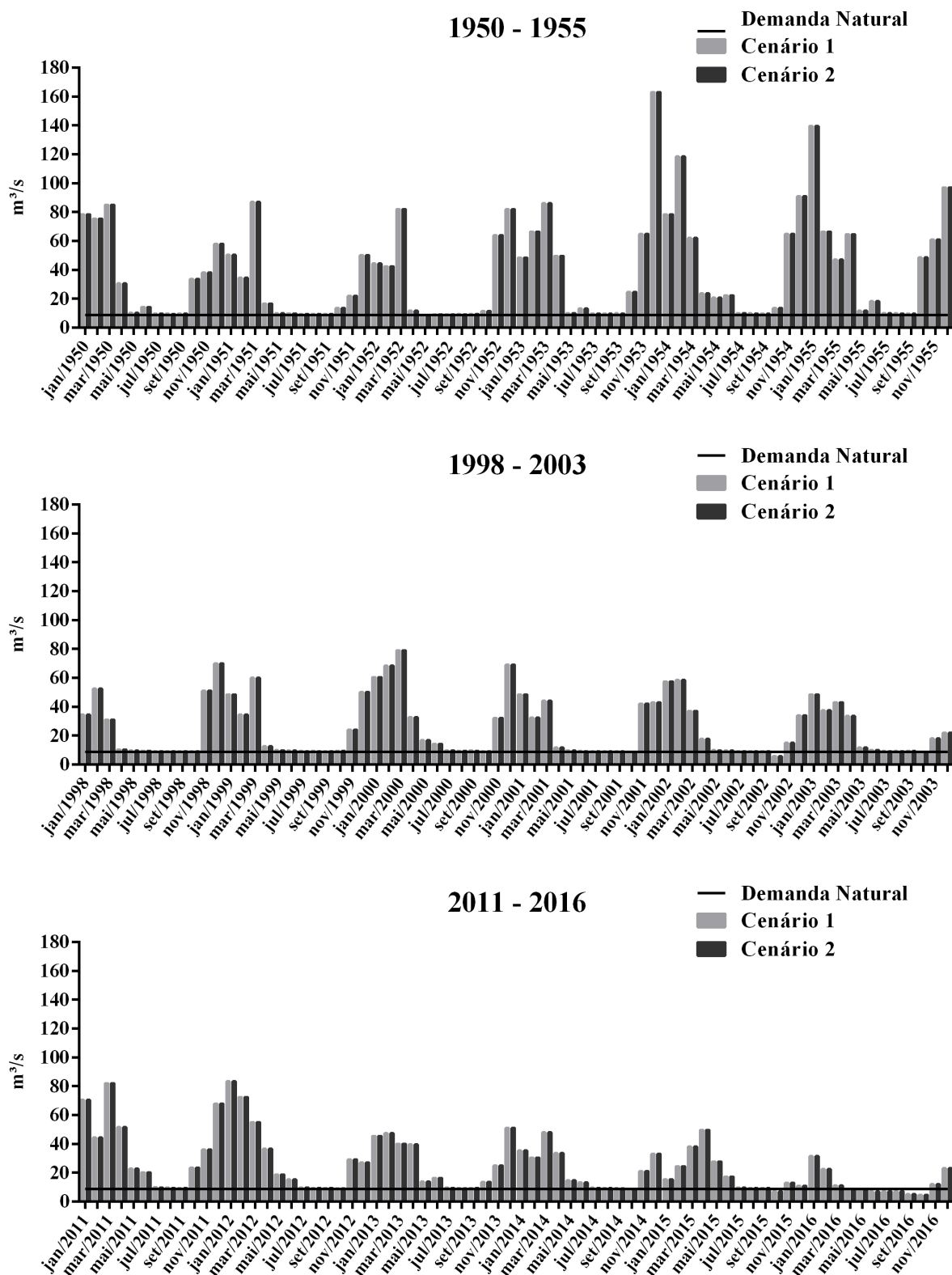
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 14 - Vazão de Jusante para atendimento à Vazão Mínima Natural - Retiro Baixo



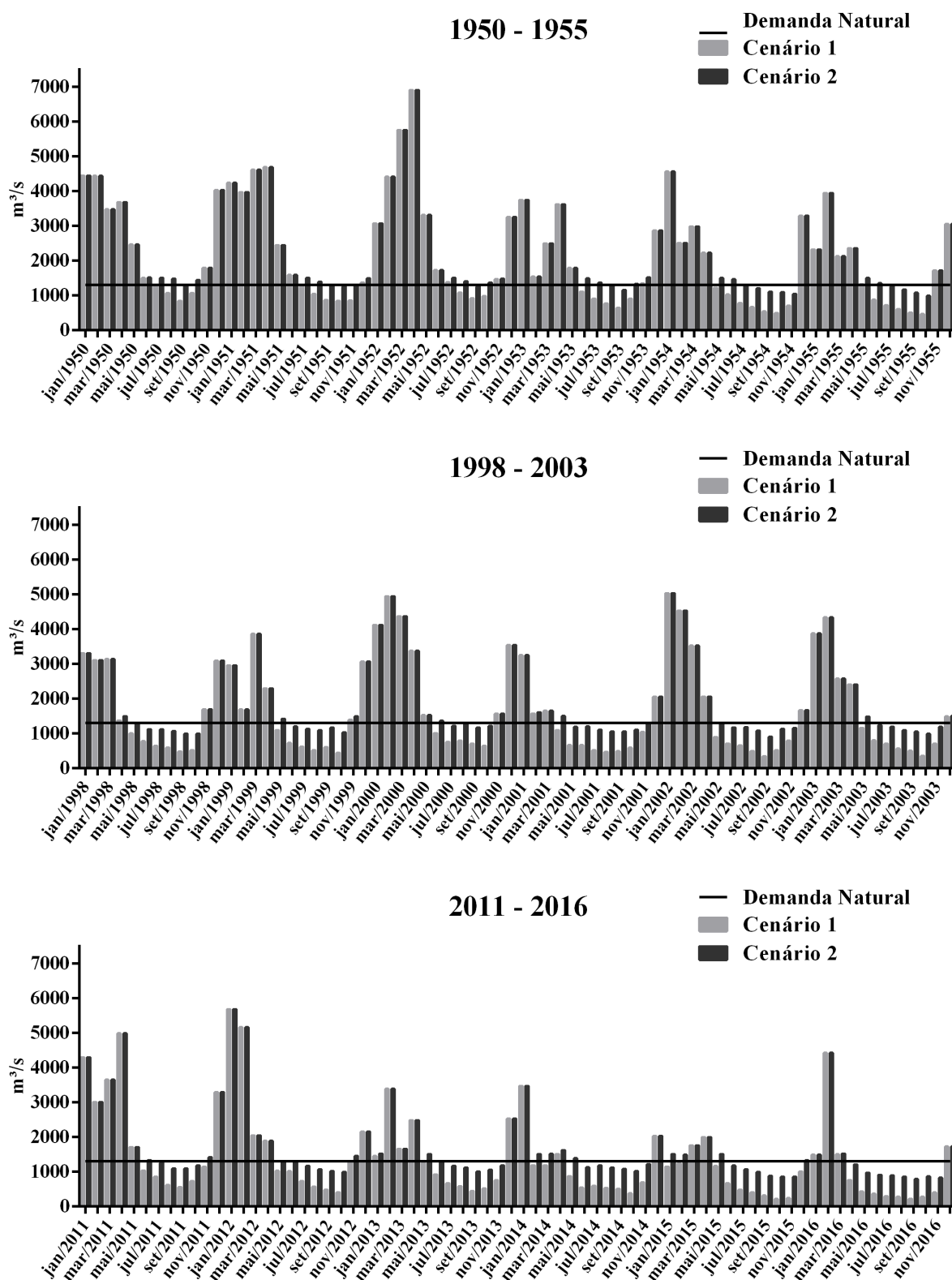
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 15- Vazão de Jusante para atendimento à Vazão Mínima Natural – Queimado



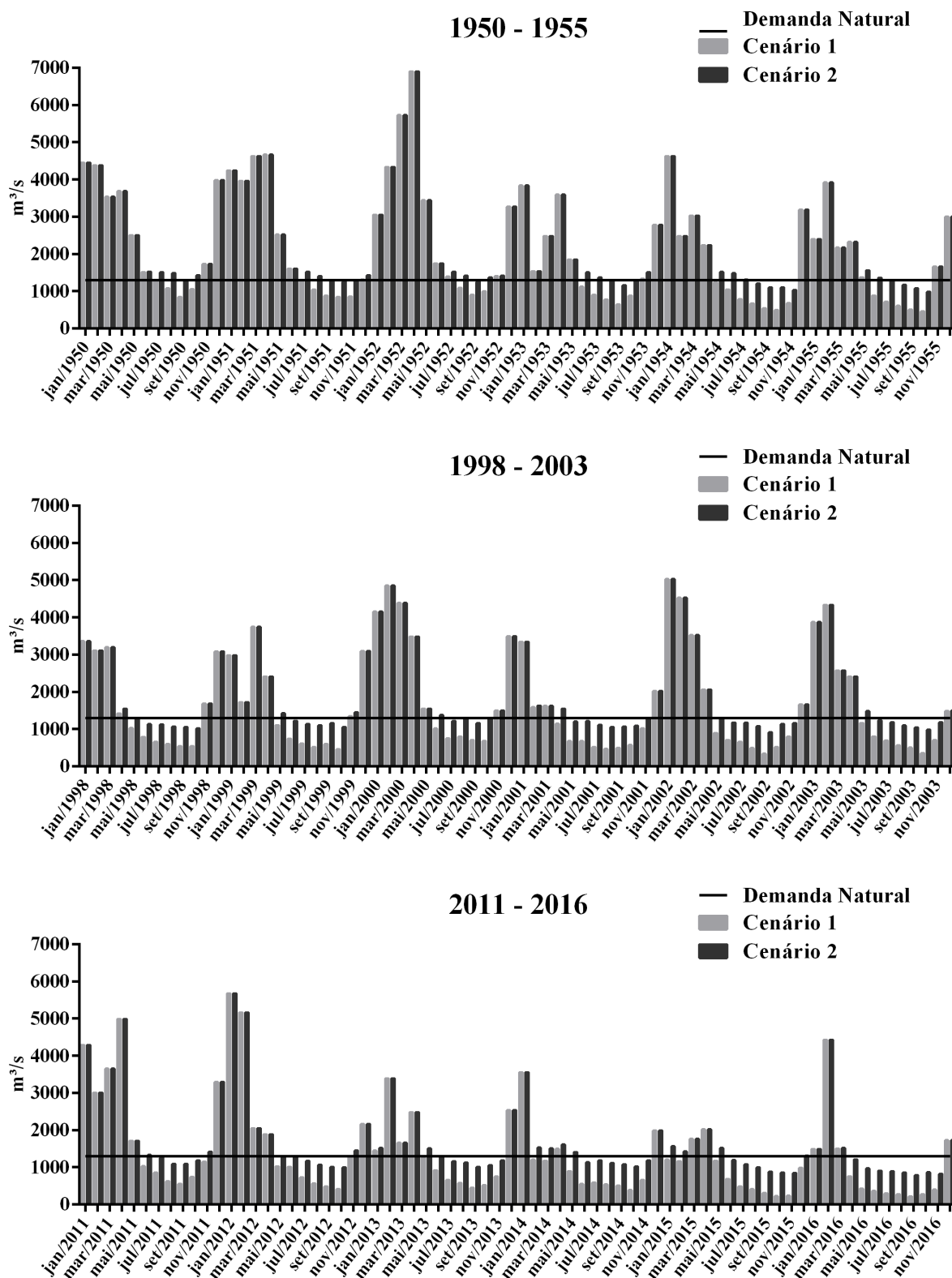
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 16 - Vazão de Jusante para atendimento à Vazão Mínima Natural – Itaparica



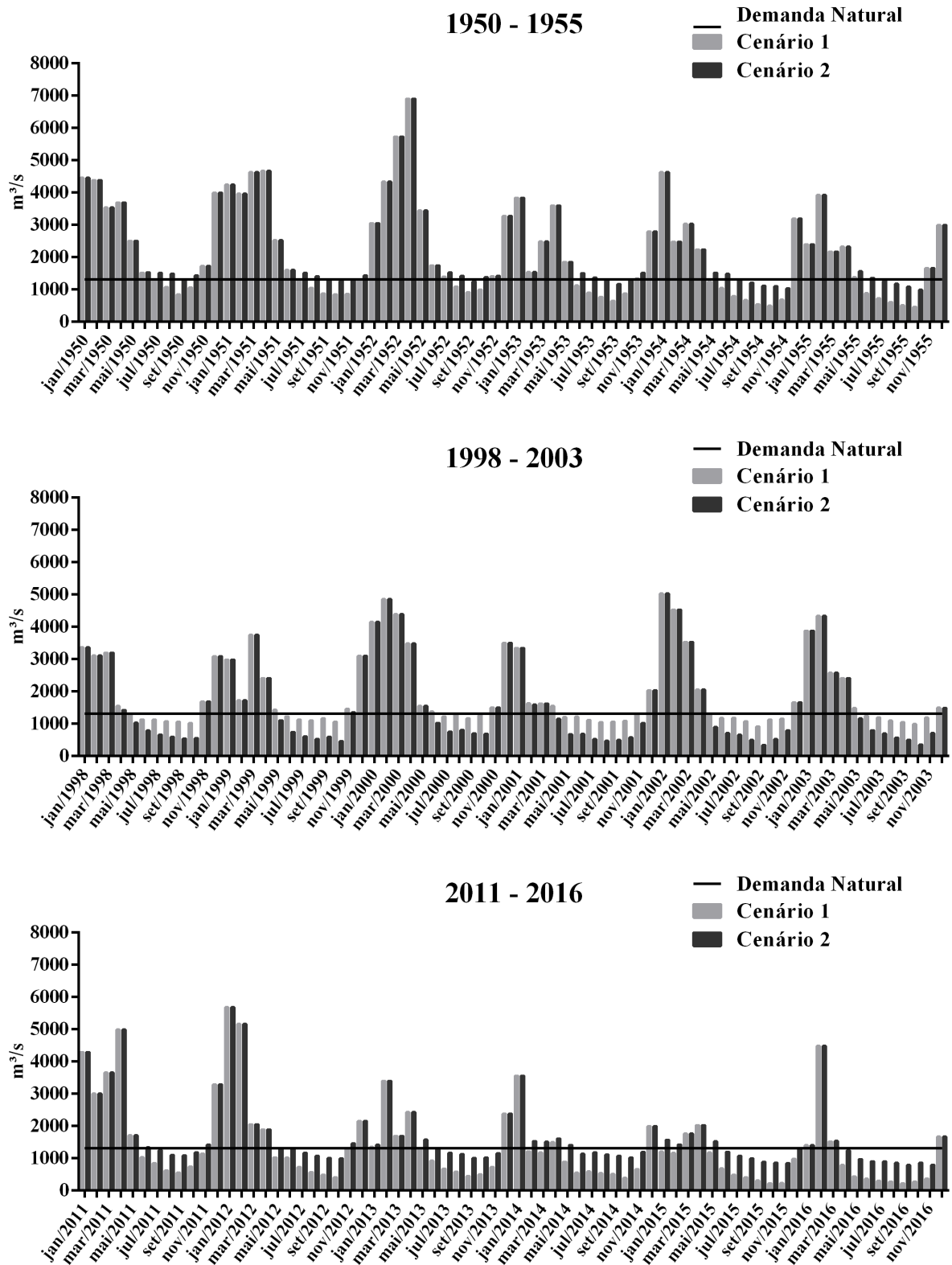
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 17 - Vazão de Jusante para atendimento à Vazão Mínima Natural - P. Afonso/Moxotó



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 18- Vazão de Jusante para atendimento à Vazão Mínima Natural – Xingó



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.

Apêndice 19 - Índices de Desempenho para Atendimento à Vazão Natural Mínima Natural

Código	Período	Confiabilidade	Resiliência
155	CENÁRIO 01	50-55	90.28%
		98-03	83.33%
		11-16	56.94%
	CENÁRIO 02	50-55	88.89%
		98-03	81.94%
		11-16	54.17%
162	CENÁRIO 01	50-55	98.61%
		98-03	95.83%
		11-16	87.50%
	CENÁRIO 02	50-55	98.61%
		98-03	95.83%
		11-16	87.50%
172	CENÁRIO 01	50-55	59.72%
		98-03	45.83%
		11-16	34.72%
	CENÁRIO 02	50-55	77.78%
		98-03	52.78%
		11-16	50.00%
176	CENÁRIO 01	50-55	59.72%
		98-03	45.83%
		11-16	34.72%
	CENÁRIO 02	50-55	77.78%
		98-03	51.39%
		11-16	50.00%
178	CENÁRIO 01	50-55	59.72%
		98-03	45.83%
		11-16	36.11%
	CENÁRIO 02	50-55	77.78%
		98-03	51.39%
		11-16	50.00%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017.